



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Centro de Ciências Agrárias

Departamento de Solos e Engenharia Rural

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

**ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS, ESCOAMENTO SUPERFICIAL E
FORMAÇÃO DE CROSTA EM SOLOS REPRESENTATIVOS DO ESTADO DA
PARAÍBA**

Rodolpho José de Almeida Nascimento

Areia, PB

Fevereiro - 2019

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO

**ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS, ESCOAMENTO SUPERFICIAL E
FORMAÇÃO DE CROSTA EM SOLOS REPRESENTATIVOS DO ESTADO DA
PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutor em Ciência do Solo". Área de concentração: Solos em Agroecossistemas Familiares

Orientador: Flávio Pereira de Oliveira, Dr.

Areia, PB

Fevereiro - 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244e Nascimento, Rodolpho José de Almeida.

Erodibilidade em entressulcos, escoamento superficial e formação de crosta em solos representativos do estado da Paraíba / Rodolpho José de Almeida Nascimento. - Areia, 2019.

114f. : il.

Orientação: Flávio Pereira de Oliveira.

Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Erosão hídrica. 2. Chuva simulada. 3. Região semiárida. 4. Estabilidade de agregados. 5. Selamento superficial. I. Oliveira, Flávio Pereira de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO

**ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS, ESCOAMENTO SUPERFICIAL E
FORMAÇÃO DE CROSTA EM SOLOS REPRESENTATIVOS DO ESTADO DA
PARAÍBA**

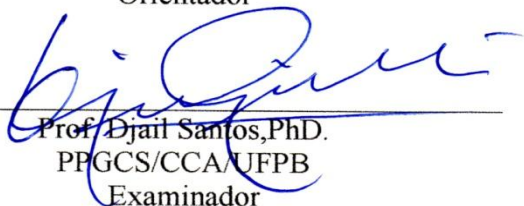
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
"Doutor em Ciência do Solo". Área de concentração:
Solos em Agroecossistemas Familiares

Aprovada em: 20 de fevereiro de 2019


BANCA EXAMINADORA



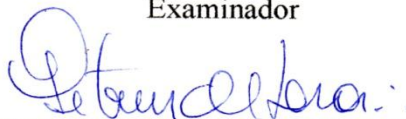
Prof. Flávio Pereira de Oliveira, Dr.
PPGCS/CCA/UFPB
Orientador



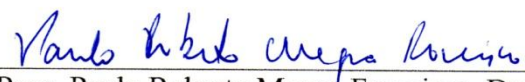
Prof. Djail Santos, PhD.
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador



Prof. Raphael Moreira Beirigo, Dr.
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador



Prof. Petrus Luiz de Luna Pequeno, Dr.
DECIV/NT/UNIR
Examinador



Pesq. Paulo Roberto Megna Francisco, Dr.
CCT/UEPB
Examinador

À minha esposa e filhos

FLÁVIA M^a. S. S. ALMEIDA, RAPHAEL e RAONI SOUSA DE ALMEIDA

Por seus conselhos e paciência, pelas constantes palavras de FORÇA e CORAGEM, por seu amor e compreensão, pelo tempo investido no NOSSO sonho e por acreditar que seria possível, mesmo quando EU já havia desistido;

A minha mãe

ROSSANA RAMOS DE ALMEIDA

Por seu incentivo, por ter me dado todas as condições necessárias SEMPRE, por seu apoio e amor incondicional, pelas palavras certas nos momentos certos, pela vida;

Aos meus avós maternos

ISRAEL BATISTA DE ALMEIDA (in memoriam) e SELY RAMOS DE ALMEIDA

Por seus cuidados e atenção, conselhos e suporte, por suas orações pedindo a DEUS que me abençoasse com inteligência e sabedoria, e por me fazerem acreditar que sempre devo ir além;

Ao meu irmão

RAIFF RAMOS DE ALMEIDA NASCIMENTO

Pelo incentivo e companheirismo, pela amizade e carinho, por estar sempre presente na luta para concluir este trabalho, pelas muitas “chuvas” em que nos molhamos juntos, pelas ótimas conversas;

Aos meus eternos MESTRES

Dr. LEOSSÁVIO, Dr. IVANDRO e Dr. FLÁVIO

Por sua orientação, pelas conversas e conselhos, por sua paciência, pelo conhecimento transmitido, por terem sido meus tutores no caminho da ciência e da vida em diversos aspectos;

DEDICO.

Ao meu *DEUS*, criador, pai, amigo e companheiro de todas as horas;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira, por sua amizade, por sua infinita paciência, por dividir seu conhecimento e sabedoria e, principalmente, por ser compreensivo e acima de tudo, *HUMANO*, frente os percalços e as adversidades, sempre cobrando quando preciso, e encorajando quando mais necessário;

Aos membros da banca avaliadora, por terem investido seu tempo para melhoria deste trabalho, por suas considerações e proposições, por atenderem ao nosso convite;

A minha chefia imediata, a Prof^ª. Dr^ª. Vânia da Silva Fraga e o Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias, por seu apoio, incentivo e amizade;

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, ao Departamento de Solos e Engenharia Rural e ao Centro de Ciências Agrárias por toda a estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos amigos e colegas de curso e aos professores com os quais tive o privilégio de conviver e estudar;

Aos amigos que fiz no ambiente de trabalho, companheiros do dia a dia, por terem ajudado de diversas formas;

A todos os meus amigos e familiares;

A todos que fizeram parte desta obra de forma direta e indireta.

MINHA ETERNA GRATIDÃO.

A vida vai te bater, e vai te bater muito. *“Você, eu, ninguém vai bater tão forte como a vida, mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que se consegue vencer”*.

As cicatrizes servirão para lembrar que o passado foi real. Nem sempre a vida vai te mandar um leão por dia. Uma frase clássica como: *“Com grandes poderes vêm grandes responsabilidades”* não foi escrita à toa. Chega-se a um ponto existencial, em que, um leão por dia não te dá mais experiência, simplesmente, porque você está em outro nível.

Em um determinado momento, a vida vai te propor desafios maiores, algo que nem sempre você saberá de certeza se é capaz de enfrentar, mas não porque os Deuses, o Destino ou o Universo (como queira chamar) estejam tentando te prejudicar ou te derrubar, mas sim, te testar, saber até onde você consegue ir, até onde você pode chegar. Desafios são propostos para que você escolha se vá ou não os aceitar, e se aceitá-los, superar ou não, será consequência de suas escolhas, das decisões que você tomou, se superou os desafios anteriores para ter experiência suficiente para superar os próximos.

Um leão por dia já não representa desafio. Enfrento Dragões por dia, Balrogs por dia, e até o fim da semana, enfrentarei um Tarrasque se for preciso. Enfrente seus desafios, ganhe experiência, se supere e enfrente mais desafios. Nunca pare, *“Nunca se retire, nunca se renda”*. Um guerreiro sem cicatrizes é um guerreiro sem glórias.

– Rodolpho J. A. Nascimento

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Processo de erosão hídrica do solo	3
2.2. Erosão em entressulcos	5
2.3. Escoamento superficial	7
2.4. Erodibilidade do solo	9
2.5. Formação de selo e crosta superficial	12
2.6. Erosividade das chuvas	13
2.7. Classes de Solos	15
2.7.1. LATOSSOLO AMARELO Distófico petroplântico (LA)	17
2.7.2. ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abruptico (PV)	18
2.7.3. NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RL)	19
2.7.4. LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vertissólico (TC)	20
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO I	34
Escoamento superficial e erodibilidade em entressulcos de solos representativos da Paraíba	34
RESUMO	35
ABSTRACT	36
INTRODUÇÃO	37
MATERIAL E MÉTODOS	40
Caracterização física, química e mineralógica dos solos	41
Chuvas simuladas	43
Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos	44
Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos	45
Análises estatísticas	47

RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS	61
CAPÍTULO II	73
Selamento superficial e formação de crosta em solos representativos da Paraíba.....	73
RESUMO	74
ABSTRACT	75
INTRODUÇÃO	76
MATERIAL E MÉTODOS	78
Caracterização física, química e mineralógica dos solos	78
Chuvas simuladas	81
Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos	82
Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos.....	83
Selamento superficial e formação de crosta	84
Análises estatísticas	85
RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
CONCLUSÕES.....	95
REFERÊNCIAS	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de solo, localização de coleta, vegetação predominante, relevo, média de precipitação anual, formação geológica e litologia, mineralogia e índice de intemperismo dos solos avaliados.....	41
Tabela 2. Características físicas e químicas dos solos avaliados	42
Tabela 3. Características hidráulicas do escoamento superficial em entressulcos para os diferentes solos estudados.....	48
Tabela 4. Perdas totais de solo (PS_i), taxa máxima de desagregação do solo (D_i) e erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) obtidos em condições de laboratório, sob chuva de 85 mm h^{-1} ($i = 2,36 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) e declividade de $0,10 \text{ m m}^{-1}$	52
Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre o teor de óxido de alumínio de baixa cristalinidade (Al_o), diâmetros médios ponderados dos agregados obtidos por via úmida ($DMPA_U$), por via seca ($DMPA_S$), índices de estabilidade de agregados (IEA_T e IEA_C) Perdas totais de solo (PS_i), Taxa máxima de desagregação do solo (D_i) e erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) com os componentes da caracterização física e química dos solos avaliados	54
Tabela 6. Valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) obtido experimentalmente em laboratório e estimados por equações matemáticas obtidas por análise de regressão, para os solos avaliados.....	58
Tabela 7. Classes de solo, localização de coleta, vegetação predominante, relevo, média de precipitação anual, formação geológica e litologia, mineralogia e índice de intemperismo dos solos avaliados.....	79
Tabela 8. Características físicas e químicas dos solos avaliados.....	80
Tabela 9. Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos para os três ensaios com chuvas simuladas obtidas em condições de laboratório	87
Tabela 10. Perdas totais de solo (PS_i), taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtidos em condições de laboratório, sob chuva de 85 mm h^{-1} ($i = 2,36 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) e declividade de $0,10 \text{ m m}^{-1}$ em três épocas de aplicação	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Erosividade das chuvas no estado da Paraíba	15
Figura 2. Localizações da coleta das amostras dos solos.	16
Figura 3. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) ao longo do tempo de ensaio com chuva simulada, para os testes realizados em condições de laboratório, de solos do estado da Paraíba (LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico).	50
Figura 4. Correlações entre a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) com as propriedades do solo: (A) Índice de estabilidade de agregados segundo Teixeira et al. (2017); (B) Diâmetro médio ponderado de agregados peneirados via úmida; (C) Óxido de ferro extraído com oxalato de amônio ácido; (D) Fração da areia fina (0,25-0,106 mm); (E) Fração de areia grossa (1-0,5 mm); (F) Fração de areia muito grossa (2-1 mm)	56
Figura 5. Concentração de sedimentos em suspensão para: Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Litólico (RL) e Luvisolo Crômico (TC), ao longo da duração de aplicação das chuvas nos tempos de ensaio 0, 7 e 14 dias.	90
Figura 6. Evolução da rugosidade superficial de Manning (n) no Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Litólico (RL) e Luvisolo Crômico (TC) ao longo da duração de aplicação das chuvas nos tempos de ensaio 0, 7 e 14 dias	92

RESUMO

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. Erodibilidade em entressulcos, escoamento superficial e formação de crosta em solos representativos do estado da Paraíba. Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Fevereiro de 2019. 114f. il. Tese. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

A compreensão das relações envolvidas no processo de erosão hídrica é objetivo de todos que lidam com a degradação ambiental e os prejuízos agrícolas causados por ela. Com o intuito de auxiliar o desenvolvimento de estratégias de preservação do solo e contenção desse tipo de erosão, os objetivos do presente estudo foram: Capítulo I) determinar as características do escoamento superficial e o fator de erodibilidade em entressulcos (K_i) dos solos avaliados; estabelecer correlações entre propriedades físicas e químicas dos solos com o K_i , para desenvolver um modelo matemático para sua predição; aplicar modelos existentes na literatura para estimativa indireta do K_i e avaliar sua aplicabilidade para os solos desse estudo; Capítulo II) avaliar, de forma indireta, o selamento superficial e a formação de crosta através das mudanças nas variáveis hidráulicas e na erodibilidade em entressulcos dos solos. Foram avaliados quatro solos: Latossolo Amarelo (LA); Argissolo Vermelho (PV); Neossolo Litólico (RL); Luvisolo Crômico (TC). O critério de seleção teve como base o grau de desenvolvimento pedogenético. Em laboratório conduziram-se os experimentos de erosão em entressulcos sob chuva simulada, com solo descoberto e declividade da parcela de $0,10 \text{ mm}^{-1}$. Os testes foram realizados em parcelas experimentais, com área útil de $0,3481 \text{ m}^2$, onde efetuou-se ensaios com chuvas simuladas, com intensidade média ajustada em 85 mm h^{-1} durante 75 minutos. As chuvas simuladas foram aplicadas em três eventos consecutivos com intervalos de 7 dias (Períodos 0, 7 e 14 dias), para determinar os efeitos da formação do selamento superficial durante a chuva e a formação de crosta após o período de secagem do solo. Foram avaliadas taxas de perdas de solo (PSi), concentração de sedimentos em suspensão, vazão, taxa de desagregação do solo (D_i), caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento e a erodibilidade do solo em entressulco (K_i). O regime de escoamento em todos os solos foi caracterizado como laminar lento ou subcrítico e a ocorrência de erosão em entressulcos foi confirmada. No Capítulo I, foi possível concluir que: as características físicas e químicas de cada solo apresentaram influência mais direta no entendimento do comportamento das variáveis hidráulicas do escoamento superficial e da erodibilidade em entressulcos do que o grau de desenvolvimento pedogenético; o Luvisolo Crômico (TC), mesmo sendo menos desenvolvido, apresentou-se o mais estável, com os menores PSi , D_i e K_i ; Os modelos existentes aplicados para estimativa indireta do K_i não se adequaram para todos os solos avaliados; O modelo sugerido nesse estudo, propõe a utilização dos valores do $DMPA_U$ e do Fe_o para estimativa do K_i em solos com características semelhantes dos solos avaliados. No Capítulo II, concluiu-se que a formação de selamento e de crostas superficiais foram observadas com aumento da velocidade de escoamento e da descarga líquida, e a diminuição da altura da lâmina de água, assim como nas alterações em PSi , D_i e K_i , sendo no primeiro evento de chuva simulada a maior contribuição para formação do encrostamento superficial; O TC se mostrou o mais estável após os eventos sucessivos de chuva simulada e mesmo tendo a rugosidade superficial modificada, não apresentou alterações significativas na concentração de sedimento em suspensão, perdas totais de solo, taxa máxima de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos.

Palavras Chave: Erosão hídrica, chuva simulada, região semiárida, estabilidade de agregados, selamento superficial.

ABSTRACT

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. **Interill erodibility, surface flow and crusting in representative soils of Paraíba state.** Areia - PB, Agricultural Science Center, UFPB, February 2019. 114f. il. Thesis. Postgraduate Program of Soil Science. Advisor: Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

The understanding of the relationships involved in the water erosion process is the goal of everyone who deals with environmental degradation and the agricultural losses caused by it. In order to assist in the development of soil preservation strategies and containment this type of erosion, the present study aimed to: Chapter I) determine the characteristics of surface runoff and the determination of interill erodibility of the evaluated soils; establish correlations between physical and chemical properties of soils and K_i , in order to establish a mathematical model for their prediction; apply existing models for indirect estimation of K_i and evaluate its applicability to the soils of this study. Chapter II) indirectly evaluate surface sealing and crust formation through changes in hydraulic variables and soil interill erodibility. Four soils were evaluated: Ferralsol (FR); Acrisol (AC); Leptosol (LP); Luvisol (LV). The selection criterion was based on the degree of pedogenetic development. The interill erosion experiments were conducted under simulated rainfall, in laboratory conditions, with uncovered soil and plot slope of the 0.10 mm^{-1} . The tests were carried out in experimental plots, with a useful area of 0.3481 m^2 , where it was carried out tests with simulated rains, with mean intensity adjusted in 85 mm h^{-1} for 75 min. Simulated rains were applied at three consecutive events at 7 day intervals (Periods 0, 7 and 14 days) to determine the effects of surface sealing during rainfall and crust formation after the soil drying period on plot. Soil loss rates (PSi), suspended sediment concentration, flow rate, soil disaggregation rate (D_i), characterization of hydraulic flow variables and soil interill erodibility (K_i) were evaluated. The flow regime in all soils was characterized as slow or subcritical laminar and the occurrence of interrill erosion was confirmed. In Chapter I, it was possible to conclude that physical and chemical characteristics of each soil had a more direct influence in the understanding of the behavior of hydraulic variables of the surface runoff and the interill erodibility than the degree of pedogenetic development; among the evaluated soils, Luvisol (LV), although one of the least developed soils, was the most stable, with the lowest PSi , D_i and K_i values; the existing models applied for indirect estimation of K_i were not adequate for all evaluated soils; the model suggested in this study proposes the use of the $DMPA_U$ and the Fe_o to estimate K_i in soils with the same characteristics of the evaluated soils. In Chapter II, it was conclude that formation of sealing and surface crusts were observed with increase of the flow velocity and liquid discharge, and the decrease of the height of the water sheet, as well as in the changes in PSi , D_i and K_i , being in the first event of simulated rainfall the greater contribution to formation of superficial crusting; the LV showed the most stable after the successive events of simulated rainfall, even though the surface roughness was modified, did not present significant changes in the concentration of suspended sediment, total soil losses, maximum disaggregation rate and soil interill erodibility.

Keywords: Water erosion, rainfall simulation, semi-arid region, aggregates stability, surface sealing.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O entendimento das relações envolvidas na erosão hídrica do solo é, de longe, o objetivo de todos os que lidam com problemas causados pela desagregação e o transporte da camada superficial do solo. As principais consequências desse processo são a diminuição da produtividade agrícola, como também o assoreamento dos mananciais, desde pequenos canais até os grandes reservatórios, devido à deposição dos sedimentos.

As perdas de solo por erosão hídrica dependem da chuva e do escoamento superficial associados à natureza do solo, as características do relevo, o tipo de vegetação, do manejo do solo e das práticas conservacionistas utilizadas, podendo ser observada de forma mais acentuada em regiões semiáridas devido aos solos geralmente rasos, mal estruturados e com baixo teor de matéria orgânica, com cobertura vegetal frequentemente insuficiente para proteger a superfície, especialmente quando as práticas agrícolas de cultivo e pastagem reduzem ainda mais essa cobertura.

Com relação à natureza do solo, cada classe apresenta uma suscetibilidade à erosão devida exclusivamente às suas características edafoclimáticas intrínsecas, a qual é representada pela "erodibilidade do solo", que é uma das principais variáveis utilizadas nos modelos de predição de erosão.

Visando o controle do processo erosivo, um manejo agrícola eficiente requer o entendimento das interações entre os processos biológicos, químicos, físicos, hidrológicos e climáticos. Por esse motivo, modelos vêm sendo utilizados com mais frequência, já que estes permitem descrever matematicamente e prever as etapas de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo, auxiliando na escolha das melhores estratégias para uso e manejo do solo para as suas diversas finalidades.

A maioria dos métodos e equações utilizados nos modelos de predição da erosão hídrica do solo, como é o caso do modelo WEPP, ou *Water Erosion Prediction Project* (Flanagan & Nearing, 1995), foi desenvolvida para solos de regiões de clima temperado, de modo que em alguns casos, se faz necessário o ajuste, ou mesmo, a geração de equações que possam ser aplicadas para a estimativa dos fenômenos envolvidos nos processos erosivos de regiões com clima e solos diferentes.

A estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) também pode ser realizada por meio de métodos indiretos, que consideram as relações entre a erosão hídrica e os atributos do solo. Com isso, busca-se a utilização de um menor número de variáveis para estimar o K_i , os quais devem ser de determinação fácil, rápida e de baixo custo, em

laboratório, e retratar ao máximo as condições de campo. Apesar dos dados obtidos em laboratório representarem situações sob condições controladas, os mesmos devem aproximar-se ao máximo dos fenômenos observados em campo.

O desenvolvimento e/ou aprimoramento dos métodos indiretos de determinação da erodibilidade do solo, carecem no Brasil, de valores de referência que tenham sido obtidos de acordo com metodologias de avaliação direta (chuva natural ou simulada), permitindo assim a validação dos métodos alternativos, evitando-se possíveis erros causados pelo uso de metodologias desenvolvidas para outras regiões, uma vez que os métodos desenvolvidos nos EUA se evidenciaram inadequados às condições brasileiras, bem como os desenvolvidos no Brasil ainda apresentam limitações ao seu uso generalizado, devido à existência de muitas classes brasileiras de solos e, dentro de cada classe, diferenças no valor do fator K , atribuídas aos fatores de formação, material de origem do solo, a predominância climática no local e as condições de uso da terra.

Para que estes modelos possam estimar com maior acurácia as etapas envolvidas no processo de erosão, é necessário o levantamento de dados já existentes e a obtenção de dados complementares sobre os solos de cada região, formando uma base de dados que possa ser utilizada na geração de equações e na aplicação em modelos mais complexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de erosão hídrica do solo

A erosão hídrica e a produção de sedimentos têm sido consideradas como os problemas ambientais mais importantes do mundo (Bakker et al., 2007), podendo causar a perda de grandes quantidades de nutrientes, matéria orgânica, defensivos agrícolas e sementes, carregados juntamente com os sedimentos removidos pelo escoamento superficial, causando redução da capacidade produtiva dos solos e aumento da transferência de sedimentos e poluentes para os corpos de água (Merten & Minella, 2003; Minella et al., 2007). Estes fatores, conseqüentemente, resultam em prejuízos econômicos à atividade agrícola e a sociedade como um todo (Bertol et al., 2007).

A erosão do solo pela água induz fluxos anuais de perda de 23-42 Mt (megatoneladas) de nitrogênio e 14,6-26,4 Mt de fósforo em terras agrícolas, podendo ser comparadas as taxas anuais de aplicação de fertilizantes, que são de 112 Tg (teragramas) de N e 18 Tg de P. Essas perdas precisam ser repostas via fertilização a um custo econômico significativo, podendo chegar a cifra de US \$150 bilhões. Se o valor mediano de perda de safra anual de 0,3% em função da erosão hídrica for válido para o período de 2015 a 2050, uma redução total de 10,25% na produção agrícola poderia ser projetada para 2050 (FAO & ITPS, 2015).

Em regiões mais pobres, os recursos econômicos para obter compensações pelas perdas de nutrientes não existem, e como consequência, a remoção de nutrientes pela erosão de áreas agrícolas é muito maior que a quantidade de fertilizante aplicada (FAO & ITPS, 2015). As áreas de clima semiárido, que cobrem cerca de 24% da superfície mundial, são consideradas umas das mais vulneráveis aos impactos dos processos de erosão hídrica, tanto por fatores edafoclimáticos e práticas agrícolas comumente adotadas como por fatores socioeconômicos, sendo essa erosão o fator mais importante na degradação da terra ou na desertificação dessas áreas, e é por isso que as estratégias de restauração precisam ser desenvolvidas e aplicadas (Ligonja & Shrestha, 2015; Keesstra et al., 2016; Prosdocimi et al., 2016; Zhou et al., 2016).

A agricultura, embora tenha tido muito sucesso na produção de alimentos em virtude da vasta extensão de áreas produtivas, é a grande causadora da degradação das terras (biodiversidade, solos e recursos hídricos). O manejo e uso agrícola do solo são responsáveis por cerca de um quarto da extensão de solos degradados no mundo, enquanto

o desmatamento, que geralmente tem como objetivo a exploração agrícola da terra, é responsável por outros 40% da degradação (Asner et al., 2004), provocando enorme perda da diversidade biológica e grande impacto nos ecossistemas (Sala et al., 2000).

A erosão hídrica do solo pode levar os solos agrícolas a perderem sua capacidade produtiva, com consequente aumento de custos com saúde, alimentação, poluição e assoreamento dos cursos d'água, incorrendo em elevados gastos na recuperação de áreas degradadas (Nunes & Cassol, 2008). Dessa forma, a erosão hídrica pode prejudicar a qualidade de vida do homem, animais e plantas, além de causar problemas sociais, culturais, econômicos e ambientais.

O processo erosivo remove a camada superficial dos solos, reduzindo os teores de matéria orgânica e a atividade biológica a eles associada, diminuindo a disponibilidade de nutrientes, além de contribuir para a degradação física do solo. Em solos que apresentam restrições ao crescimento radicular, a erosão diminui a profundidade de enraizamento, o que reduz as quantidades de água, ar e nutrientes disponíveis para as plantas (Ribeiro et al., 2009).

O processo de erosão hídrica envolve a desagregação de partículas do solo da sua massa original, o transporte dessas partículas (primárias ou agregados) e eventual deposição (Asadi et al., 2007; Silva et al., 2012). A quantificação de perda de solo causada pela chuva, é feita pelo escoamento superficial produzido pelo excedente das águas da chuva que transportam os sedimentos, nutrientes e agroquímicos para os cursos de água.

Os principais agentes responsáveis pela erosão são a água, o vento e as alterações na temperatura (congelamento e descongelamento). No Brasil, assim como em outros países tropicais, os índices pluviométricos são elevados e as chuvas concentradas em determinadas épocas do ano, fazem com que estas sejam a causa mais recorrente de erosão e encrostamento das áreas com solo descoberto (Pagliai, 2003).

Quatro fatores e suas inter-relações são considerados principais determinantes da taxa de erosão hídrica: o clima, principalmente a precipitação pluviométrica; o solo, principalmente quanto a sua resistência à desagregação, a topografia, notadamente o grau do declive e o comprimento de rampa; e a cobertura do solo. Qualquer um destes fatores pode, sozinho, determinar um problema capaz de provocar erosão hídrica e como os três primeiros fatores não podem ser modificados facilmente, a cobertura do solo e o manejo das culturas, assumem um importante papel no que se refere ao controle da erosão provocada pela chuva (Smith & Wischmeier, 1962).

As consequências da erosão hídrica do solo são manifestadas dentro do local específico (*on-site*) e fora dele (*off-site*). Sendo que, *on-site*, os efeitos podem ocorrer a

curto prazo, ou seja, danos imediatos sobre crescimento de plantas, tais como: o desenraizamento de mudas, perdas de solo e água, sementes e fertilizantes transportados pela enxurrada. A longo prazo, os efeitos envolvem mudanças na qualidade do solo, impacto sobre o crescimento de plantas e produtividade futura, além da redução da profundidade efetiva de enraizamento, redução na disponibilidade de água e exposição do subsolo com menor fertilidade. Fora do local específico (*off-site*) os efeitos são complexos, manifestando mudanças ambientais adversas, inundações, assoreamento de rios e poluição dos corpos d'água (Hartanto et al., 2003).

A vulnerabilidade ou suscetibilidade do solo à erosão, resulta da interação de fatores químicos, físicos, biológicos e mineralógicos do solo (Volk & Cogo, 2008), sendo o teor de matéria orgânica, a estrutura e a permeabilidade do solo, os atributos que mais se relacionam com sua erodibilidade intrínseca (Wischmeier & Smith, 1978; Hudson, 1995).

A compreensão das relações envolvidas no processo de erosão hídrica do solo é o principal objetivo de todos que lidam com os problemas causados por esse fenômeno, como a redução da capacidade produtiva em áreas agrícolas, a contaminação do solo e da água e o assoreamento de cursos d'água e reservatórios (Bertol et al., 2003; Foster et al., 1985). Desse modo, a estimativa da erosão hídrica é essencial para o monitoramento de práticas agrícolas, pois o tipo de manejo do solo pode afetar o escoamento superficial e o aporte de sedimentos (Zhang et al., 2004), os quais dependem do tamanho, densidade e distribuição de diâmetro das partículas e agregados produzidos e, conseqüentemente, das características do solo (Foster et al., 1985).

2.2. Erosão em entressulcos

O processo de erosão hídrica do solo pode ocorrer em entressulcos ou em sulcos, sendo a erosão em entressulcos essencialmente independente da erosão em sulcos, ocorrendo em áreas relativamente curtas e geralmente orientadas segundo o microrelevo superficial (Meyer et al., 1975). A erosão em entressulcos é o início da erosão hídrica, em que as gotas de chuva causam um impacto, maior em solos com a superfície descoberta, que é o principal mecanismo na desagregação do solo, devido à energia cinética sobre a massa do solo na forma de força de pressão e cisalhamento, sendo capaz de desintegrar uma grande quantidade de partículas da massa de solo original e tem o fluxo laminar (superficial disperso) como agente principal no transporte deste material (Armstrong et al.,

2011). Por fim, ocorre a deposição desse sedimento pela ação da gravidade (Foltz et al., 2009).

A fonte de sedimentos no processo em entressulcos é constituída basicamente por materiais da superfície do solo, enquanto que na erosão em sulcos, o agente erosivo responsável pela desagregação e pelo transporte é o escoamento concentrado, sendo que a fonte de sedimentos são os horizontes superficiais e subsuperficiais (Liu et al., 2006; Govers et al., 2007). Na erosão em entressulcos, há uma seletividade de transporte de partículas finas do sedimento produzido predominantemente em suspensão em decorrência da incapacidade do escoamento superficial transportar partículas mais grosseiras, pela deposição deste sedimento ao seu peso (Shi et al., 2012).

A energia cinética da gota de chuva é o principal agente no processo de erosão em entressulco, porém, aliado a isso, a declividade também tem um importante papel na desagregação e transporte de partículas do solo. Os mesmos autores justificam o enunciado com base em três relações observadas em conclusões de diversos outros autores, de que as perdas de solo aumentam com a inclinação do declive, sendo as seguintes: I) as perdas de solo ocorreriam em função da percentagem do grau de declive; II) as perdas pelo escoamento podem ser representadas por uma função linear do seno do declive; III) as perdas pelo escoamento podem ser representadas por uma função polinomial do seno do declive (Fu et al., 2011).

O processo de erosão em entressulcos é ainda fortemente influenciado pelas condições de superfície do solo, representadas pela ausência ou presença de cobertura vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a declividade do terreno, sendo a intensidade de precipitação, a topografia e as propriedades do solo os principais fatores que interferem na erosão em entressulcos (Amorim et al., 2001; Defersha et al., 2011).

Em relação à transferência de sedimentos da região onde esses foram desagregados para a região dos sulcos, trata-se de um processo governado pelo princípio de que a carga de sedimentos a ser transportada é limitada, ou pela disponibilidade de sedimentos ou pela capacidade de transporte do escoamento difuso (Foster, 1982). Na maioria das vezes, o que limita este processo é a disponibilidade de sedimentos a ser transportada, que por sua vez, é função das taxas de destacamento dos sedimentos da massa de solo (Toy et al., 2002).

A fase de erosão entressulcos, representa a forma de erosão hídrica do solo mais prejudicial do ponto de vista agrícola, uma vez que é responsável pela remoção da camada mais superficial do solo onde se encontram a matéria orgânica, os nutrientes e os insumos agrícolas, afetando negativamente a produção das culturas, além de inferir nas condições

para ocorrência dos processos microbiológicos que refletem na fertilidade do solo (Cantalice et al., 2009), bem como carreamento de poluentes para os corpos d'água.

2.3. Escoamento superficial

O escoamento superficial é definido como sendo a parcela do ciclo hidrológico relacionada ao deslocamento da água sobre a superfície do solo até uma calha definida (Tucci, 2004). Quando a taxa de infiltração de água no solo é excedida pela intensidade da chuva, ocorre o escoamento superficial, como decorrência da superação das abstrações hidrológicas como a detenção e retenção superficial, interceptação vegetal, demanda matricial do solo e evaporação (Bezerra et al., 2010). A erosão superficial é favorecida inicialmente pela falta de cobertura nos solos e áreas declivosas, ocorrendo a erosão em entressulcos, com o advento do aumento do escoamento, forma-se a erosão em sulcos, os modos básicos de erosão do solo comumente presentes em bacias hidrográficas rurais e agrícolas (Liu et al., 2006).

Existem alguns parâmetros hidráulicos que podem ser determinados com base na descarga líquida unitária, velocidade média, temperatura e viscosidade cinemática da água, como a altura da lâmina de escoamento, fator de perda de carga, e em destaque, os números de Reynolds e o de Froude (Morgan, 1996; Govers, 1989). O número de Reynolds relaciona a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas. O número de Froude relaciona as forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais (Simons & Senturk, 1992). Após a determinação desses dois parâmetros pode ser feita a classificação do regime de escoamento.

Para valores de Froude < 1 , esse regime se caracteriza como lento, enquanto para Froude > 1 , o regime configura-se como rápido. Por outro lado, quando Reynolds < 500 , o regime caracteriza-se como laminar, entre 500 e 2500, regime transicional e para valores maiores que 2500, o regime é designado como turbulento. O escoamento em entressulcos tem seu regime caracterizado por valores de Reynolds menores que 500, onde o regime de escoamento superficial é do tipo laminar (Cassol et al., 2004).

O escoamento superficial é o principal processo associado à erosão hídrica e ocorre quando a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração da água no solo (Bezerra et al., 2010).

Embora o impacto das gotas de chuva desempenhe importante papel na desagregação das partículas de solo, é o escoamento da água que promove o transporte das

partículas de solo liberadas para áreas em que ocorre o escoamento concentrado e, dependendo da carga de sedimentos e da capacidade de transporte do escoamento, é que ocorrerá o transporte e a deposição dos sedimentos. Por esta razão, muitas das práticas para o controle da erosão são, efetivamente, práticas para o controle da velocidade e do volume de escoamento superficial. Portanto, quando assumido que o solo é um meio homogêneo com conteúdo inicial de umidade uniforme, o processo de infiltração se torna bastante complexo. Para muitos eventos de precipitação existe um período inicial durante o qual toda a precipitação se infiltra no solo. Durante este período, e como a água se infiltra, a capacidade de infiltração decresce até se tornar menor que a intensidade de precipitação; a partir deste momento, a água começa a se acumular sobre a superfície do solo nas microdepressões e o escoamento superficial pode ocorrer (Pruski et al., 2004).

O escoamento superficial na erosão em entressulcos frequentemente chamado de fluxo laminar raso, que tem regime de escoamento difuso, é o principal mecanismo de transporte do material desprendido (Nunes, 2006). Quando se trata de erosão em entressulcos, o agente principal que provoca a desagregação das partículas da massa do solo é o impacto das gotas de chuva, impondo uma energia cinética sobre a massa do solo na forma de força de pressão e cisalhamento sendo capaz de desintegrar uma grande quantidade de partículas da massa de solo original (Cassol & Lima, 2003).

Devido a sua condição hidráulica de pouca espessura de lâmina de água em relação ao elemento rugoso, o escoamento difuso tem parte de sua tensão cisalhante total dissipada em função da resistência de forma, com isso a tensão cisalhante relacionada com o transporte de sedimentos e a desagregação do solo são reduzidas. Por outro lado, o escoamento difuso sob ação da precipitação pode se tornar turbulento e ter sua capacidade de transporte aumentada quando condições referentes à relação entre a altura de lâmina de água e o tamanho de gotas forem satisfeitas (Kinnel, 2006).

Na erosão em entressulcos, a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo é responsável por afetar as características hidráulicas do escoamento. O aumento da cobertura do solo irá reduzir a velocidade do escoamento por conta do aumento da rugosidade hidráulica, que, por sua vez, irá elevar a altura da lâmina de escoamento (Cassol et al., 2004; Cantalice et al., 2009).

2.4. Erodibilidade do solo

A erodibilidade expressa, quantitativamente, a suscetibilidade do solo ao processo erosivo (Foster, 1982) e, por isso, tem despertado maior interesse na pesquisa de erosão por ser governado pelos atributos inerentes a cada solo, os quais podem variar de solo para solo e com o tipo de manejo (Silva et al., 2000). A diferença na erodibilidade de distintos solos ocorre devido às condições intrínsecas desses solos, dadas pelas características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Foster, 1982). A erodibilidade apresenta variabilidade temporal e espacial, e por isso, foi definida como uma variável de longo prazo, ao invés de um índice de resposta em eventos específicos de precipitação (Bryan, 2000).

A erodibilidade do solo pode ser entendida como sendo a suscetibilidade à erosão devida às propriedades do próprio solo, característica que reflete a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transformadas (Bastos et al., 2001). Trata-se de um parâmetro importante na previsão da erosão e planejamento do uso da terra, sendo uma propriedade do solo resultante da interação entre suas características físicas, químicas, mineralógicas e biológicas, influenciada principalmente por características que afetam a capacidade de infiltração, permeabilidade do solo e sua capacidade de resistir ao desprendimento e transporte de partículas pela chuva e enxurrada (Cassol & Lima, 2003; Amorim et al., 2009; Bertoni & Lombardi Neto, 2010). De forma generalizada, todos os parâmetros do solo que afetam sua estrutura, hidratação, e as características da circulação de água interferem na erodibilidade do solo.

A natureza do solo, que é expressa pela erodibilidade, também é um fator que influi sobremaneira nos processos erosivos, de forma que cada solo possui uma suscetibilidade diferente, a qual depende de suas características físicas, principalmente textura, estrutura, permeabilidade, densidade e profundidade, embora suas características químicas e biológicas (matéria orgânica) também devam ser consideradas. Pode-se dizer que a erodibilidade é a recíproca de sua resistência e representa a sua suscetibilidade de erodir a diferentes taxas (Franco et al., 2012).

A textura do solo atua como fator importante que influencia a erodibilidade por afetar os processos de desagregação e transporte, assim, a erodibilidade tende a aumentar quando os teores de silte e areia muito fina são elevados, e a diminuir, com a elevação dos teores de argila e de matéria orgânica. As argilas comportam-se como elemento agregante do solo, devido à sua alta atividade eletroquímica, enquanto a areia é transportada com dificuldade devido ao seu peso. Por outro lado, o silte é a porção textural mais suscetível

aos agentes erosivos, pois não possuem nem a característica agregante da argila, nem o peso da areia (Ramidan, 2003). O autor ainda menciona que a textura é a característica física mais importante do solo, devido à sua pouca mudança no tempo, e comenta que solos que apresentam 30 a 35% de argila resistem mais ao impacto das gotas de chuva e, conseqüentemente, à erosão, do que solos com menor conteúdo dessa partícula.

A estrutura é o modo como as partículas de solo se arranjam, o aspecto do conjunto dos torrões que aparecem naturalmente no solo (Lepsh, 2002). Para Bertoni & Lombardi Neto (2010) há dois aspectos a serem considerados sobre a estrutura: a propriedade físico-química da argila, que faz com que os agregados permaneçam estáveis em presença de água, e a propriedade biológica causada pela abundância de matéria orgânica em estado de ativa decomposição. A argila caulínica é mais estável que a motmorilonítica na presença de água, sendo que a maior estabilidade dos agregados condiciona menos enxurrada e menos erosão.

Wischmeier & Mannering (1969) realizaram estudos em 55 solos dos EUA (5 franco arenosos, 10 siltosos, 35 franco siltosos, 2 franco argilosos, 2 franco argilo siltosos e 1 argilo siltoso), durante cinco anos, e identificaram propriedades físicas e químicas que, de alguma forma, estariam relacionadas às perdas de solo. Concluíram que a infiltração d'água no solo e sua capacidade de resistir ao destacamento/desagregação e transporte pela ação erosiva da chuva e pelo fluxo de água são algumas das propriedades que mais influenciam a erodibilidade do solo.

A matéria orgânica desempenha um papel marcante na predição da erodibilidade, pois está relacionada com a velocidade final de infiltração e energia da chuva necessária para iniciar a enxurrada (Singh & Khera, 2009). O efeito da matéria orgânica deve-se ao fato de que na sua decomposição ocorre uma atividade muito intensa dos microrganismos, que favorece o desenvolvimento de agregados estáveis, conferindo ao solo maior permeabilidade, o que diminui a enxurrada e a erosão hídrica.

Albuquerque et al (2000), avaliando a relação entre a erodibilidade em entressulcos e a estabilidade dos agregados, com o objetivo de identificar quais os métodos de determinação de índices de estabilidade dos agregados relacionam-se com a erodibilidade do solo em entressulcos em amostras de solos com propriedades químicas, físicas e mineralógicas diferentes, concluíram que: I) em solos com alta estabilidade de agregados, a resistência à desagregação pelo impacto das gotas de chuva foi maior; II) o diâmetro médio ponderado dos agregados e o índice de estabilidade de agregados podem ser utilizados para prever a resistência do solo à erosão, pois apresentaram alta correlação com a erodibilidade em entressulcos; III) os solos com distinta mineralogia apresentaram suscetibilidade

diferente à erosão em entressulcos, sendo dentre os solos avaliados, os mais desenvolvidos (ou intemperizados) os que apresentaram maior estabilidade, resultando em menor erodibilidade do solo em entressulcos.

Vale também destacar a importância da influência da mineralogia da fração argila sobre a agregação, afetando a erodibilidade. Os solos tropicais, os quais são geralmente dominados mineralogicamente por óxidos de ferro e de alumínio e por argilas do tipo 1:1 (Resende et al., 1995), tendem a ser melhor agregados do que os solos com elevado teor de argilas do tipo 2:1 devido a presença de cargas disponíveis em sua superfície.

Le Bissonais & Singer (1993), estudaram 17 solos da Califórnia e verificaram que os solos com maiores teores de C orgânico e de óxidos de Fe e Al (extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato) apresentaram maior taxa de infiltração e menor erosão em entressulcos. Nunes & Cassol (2008), estimando a erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul, concluíram que os teores de argila total e de óxidos de Fe de baixa cristalinidade, extraídos com oxalato de amônio ácido (Feo), explicaram 97% ($p < 0,01$) da erodibilidade em entressulcos, sugerindo a utilização desses fatores para estimativa da erodibilidade em entressulcos para solos semelhantes.

A medição direta da taxa de desagregação em entressulcos é cara e demanda tempo. Além disso, existe grande variabilidade nas propriedades dentro da mesma classe de solo. Logo, a medição direta da erodibilidade obtida em campo em determinado solo não pode ser extrapolada para solos da mesma classe em outros locais (Albuquerque et al., 2000). Os mesmo autores afirmam que uma alternativa para obter o fator erodibilidade é através de relações com propriedades do solo.

Essa relação entre as propriedades do solo e sua erodibilidade vêm sendo pesquisada ao longo do tempo no cenário tropical, suprimindo gradativamente a necessidade de criação de bases de dados e geração de equações, que podem ser utilizadas para adequação dos modelos matemáticos de previsão da erosão hídrica, uma vez que esses modelos foram desenvolvidos, predominantemente, para solos de clima temperado. Esses modelos matemáticos, a exemplo da USLE e do WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), uma vez calibrados, podem ser utilizados como alternativa para previsão da erosão hídrica do solo de forma indireta, mais rápida e menos onerosa.

2.5. Formação de selo e crosta superficial

A ação direta do impacto das gotas de chuva na superfície descoberta do solo ocasiona uma série de efeitos como: desintegração de agregados, destacamento, transporte e deposição de partículas, causando erosão e modificando a estrutura superficial do solo de várias formas. Uma das alterações que ocorre é a formação de encrostamento superficial, característica comum em solos cultivados de várias regiões do mundo (Kinnel, 2005; Hu et al., 2012; Dalla Rosa et al., 2013).

O impacto da chuva na superfície do solo é um dos principais fatores para a formação do selamento superficial. A energia cinética associada ao impacto das gotas de chuva destrói os agregados do solo e, ao mesmo tempo, ocorrem processos de dispersão físico-química e posterior reorganização de partículas. A porosidade na superfície do solo é significativamente reduzida através do preenchimento e entupimento dos poros pelo material fino transportado pela enxurrada, a compactação associada aos impactos de gotas de chuva e a deposição de partículas de argila na superfície do solo após chuva (Assouline, 2004). Esse processo dá origem a um selo estrutural. A desidratação do selo superficial criado durante a chuva resulta na formação de uma crosta estrutural, ou seja, o selamento superficial ocorre na fase úmida ou durante a precipitação, e a crosta superficial se forma a partir da secagem do solo, tornando o selo uma crosta superficial (Armenise et al., 2018).

A crosta superficial é uma fina camada de material consolidado na superfície do solo, com características mecânicas e estruturais significativamente diferentes da zona subjacente, que se desenvolve como resultado de interações temporais e espaciais entre propriedades físicas, biológicas e químicas (Armenise et al., 2018). Segundo Valentin & Bresson (1992), as crostas são formadas sob chuva ou irrigação através de dois processos principais: inicialmente, o impacto da gota de chuva desagrega a estrutura da superfície do solo em micro-agregados, que são rearranjados “*in situ*”, sem evidência de movimento lateral, formando crostas estruturais; posteriormente, as crostas deposicionais são formadas pela translocação de microagregados por escoamento ou ainda por processos deposicionais, como em poças, que podem ser depositadas a distâncias variáveis a partir da origem.

A resistência do solo à erosão em entressulcos varia durante a chuva e depende da persistência das mudanças na estrutura do solo, após diferentes ciclos de secagem e umedecimento, refletindo na formação sequencial de selo e de crosta superficiais (Kuhn & Bryan, 2004), os quais podem aumentar a erosão hídrica do solo (Huang & Bradford, 1993). As alterações das condições superficiais dependem das características do solo como

textura, mineralogia, matéria orgânica, umidade inicial, distribuição, tamanho e estabilidade dos agregados (Fox & Le Bissonnais, 1998; Le Bissonnais & Singer, 1993), bem como dos fatores climáticos, especialmente da chuva (intensidade, distribuição de tamanho de gota, energia cinética), além da cobertura vegetal, atividade biológica e uso da terra (Le Bissonnais et al., 2005).

Dentre os eventos de secagem e umedecimento pela chuva, pode ocorrer a reestruturação da crosta (Kuhn & Bryan, 2004). A formação de selo pode levar a um aumento temporário da resistência do solo, mas assim que esta for superada poderá ocorrer novamente a quebra dos agregados, ou seja, é um processo cíclico. A magnitude e a variação temporal desse processo, considerando uma mesma precipitação pluvial, serão dependentes do tipo de solo e de suas condições iniciais de umidade. A formação de selo e de crosta no solo é um processo dinâmico (Moore & Singer, 1990; Truman et al., 1990), que resulta da quebra de agregados e pode reduzir a taxa de infiltração da água no solo e induzir à erosão pelo incremento do escoamento superficial (Moore & Singer, 1990; Reichert et al., 1992; Le Bissonnais & Singer, 1993; Le Bissonnais et al., 1995; Le Bissonnais, 1996).

Segundo Dalla Rosa et al. (2013) e Brandão (2006), o estudo e o detalhamento do processo de formação de crostas do solo podem ser monitorados diretamente, utilizando técnicas de microscopia para análises micromorfológicas, ou indiretamente, pela observação da alteração nas características físicas e hídricas do solo inerentes a condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo. Diversos estudos abordando selamento superficial e encrostamento do solo têm sido realizados, desde o início do século XX, e o interesse em ambos os fenômenos, não surpreendentemente, continua, em razão das suas importantes consequências, ao meio ambiente, além de ocorrência do fenômeno em culturas agrícolas de importância econômica (Souza et al., 2014).

2.6. Erosividade das chuvas

Tempestades ou eventos de chuvas intensas são os fenômenos meteorológicos considerados as principais causas de problemas em áreas agrícolas e florestais, causando a diminuição da produtividade, o aumento da incidência de deslizamentos de terra, a perturbação e o desequilíbrio em ecossistemas, a poluição em corpos d'água, além de inundações (Oliveira et al., 2018).

O conceito de erosividade da chuva apresentado por Hudson (1971) e Wischmeier & Smith (1978) descreve a erosividade como uma interação entre a energia cinética das

gotas de chuva e a superfície do solo. Isso pode resultar em um maior ou menor grau de destacamento e transporte de partículas de solo de acordo com a quantidade de energia e intensidade de chuva, considerando o mesmo tipo de solo, as mesmas condições topográficas, cobertura do solo e manejo (Silva, 2004).

A erosividade das chuvas é um dos fatores mais importantes que influenciam a erosão do solo, reconhecida como o melhor parâmetro para prever o potencial erosivo do impacto das gotas de chuva nos solos (Isikwue et al., 2015). Algumas propriedades de precipitação, como intensidade de chuva e energia cinética, velocidade terminal de gotas de chuva e tamanho são os parâmetros mais usados para calcular os índices de erosividade (Oliveira et al., 2018). Entre os índices de erosividade, o fator erosividade da chuva (fator-R) da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS/USLE) (Wischmeier e Smith, 1978) é o índice mais utilizado para predição de erosão nos trópicos (Waltrick et al., 2015).

Oliveira et al. (2013) realizando uma revisão sobre a erosividade das chuvas no Brasil, concluíram que a erosividade anual das chuvas varia de 1672 a 22.452 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, sendo os valores mais baixos encontrados na região Nordeste, e os maiores valores encontrados nas regiões Norte e Sudeste, corroborando com o observado por Silva et al. (2004), que apresenta um mapa da erosividade das chuvas no Brasil, a partir de várias equações da literatura. A mais baixa erosividade das chuvas para região Nordeste foi atribuída aos baixos índices de precipitações anuais para a região, principalmente para região semiárida (Oliveira et al., 2018). Ainda existe a dificuldade de obtenção de uma base de dados mais consistente e com informações mais detalhadas para região (Trindade et al., 2016).

Em estudo mais detalhado sobre a variabilidade espacial da erosividade das chuvas no estado da Paraíba, Amaral et al. (2014) concluíram que há uma tendência na diminuição da erosividade no Estado, decrescendo no sentido Leste–Oeste, exceto na mesorregião do Sertão paraibano, apresentando erosividades mais elevadas a exemplo das regiões mais litorâneas como a zona da mata. Os mesmos autores afirmaram que as erosividades encontradas variaram de acordo com os valores da precipitação, e estabeleceram o valor mediano da erosividade para o estado da Paraíba de 5.032 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ classificando como média. A partir desse estudo, os autores elaboraram um mapa de erosividade das chuvas para o estado da Paraíba, observado na Figura 1.

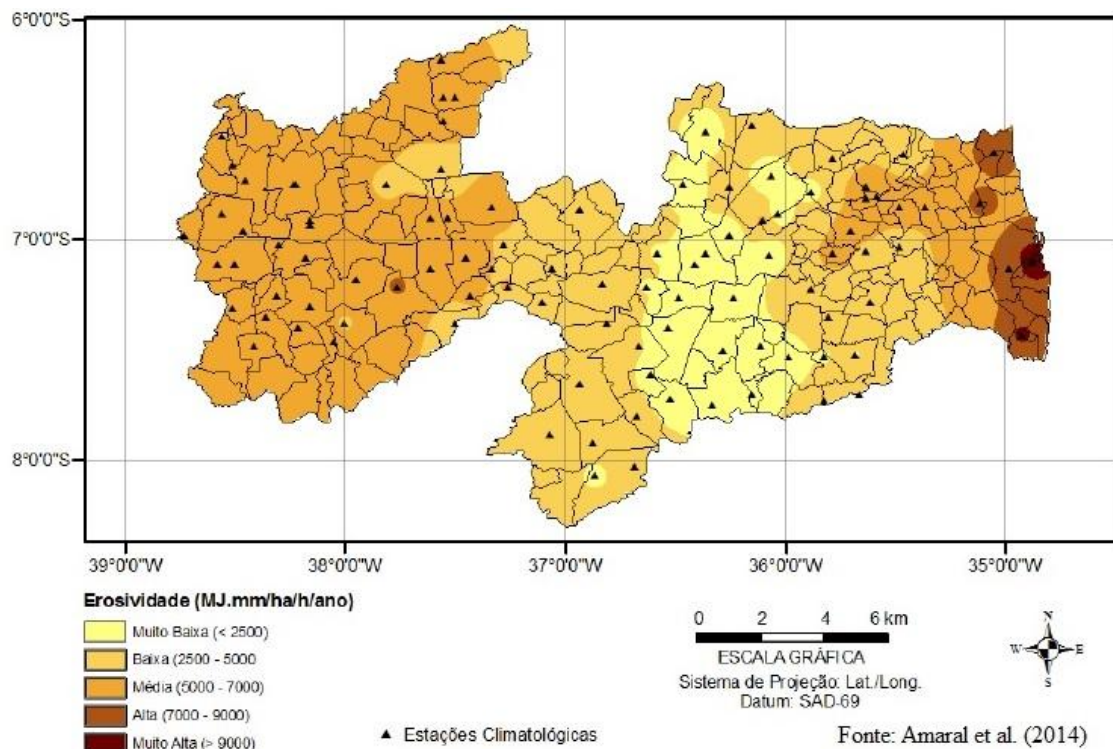


Figura 1. Erosividade das chuvas no estado da Paraíba

2.7. Classes de Solos

As amostras utilizadas neste estudo foram selecionadas levando em consideração o Banco de Solos Representativos do Estado da Paraíba (Oliveira et al., 2006). Dentre os solos que compõem esse banco de solos, foram selecionadas quatro classe com diferentes graus de desenvolvimento, sendo duas mais desenvolvidas: LATOSSOLO AMARELO Distófico petroplúntico (LA) e ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto (PV); e duas menos desenvolvidas: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RL) e LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vertissólico (TC).

Os solos foram caracterizados no “Levantamento Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba” (Brasil, 1972), que serviu como referência para a definição dos locais de coleta do solo (Figura 2), através de perfis identificados e numerados no Boletim, em que: LA é identificado como perfil nº 4; o PV é identificado como perfil nº 23; o RL é identificado como perfil nº 53 e o TC é identificado como perfil nº 30. Os mesmo solos foram reclassificados quanto a sua nomenclatura para as classes correspondentes no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013) por Medeiros (2018).

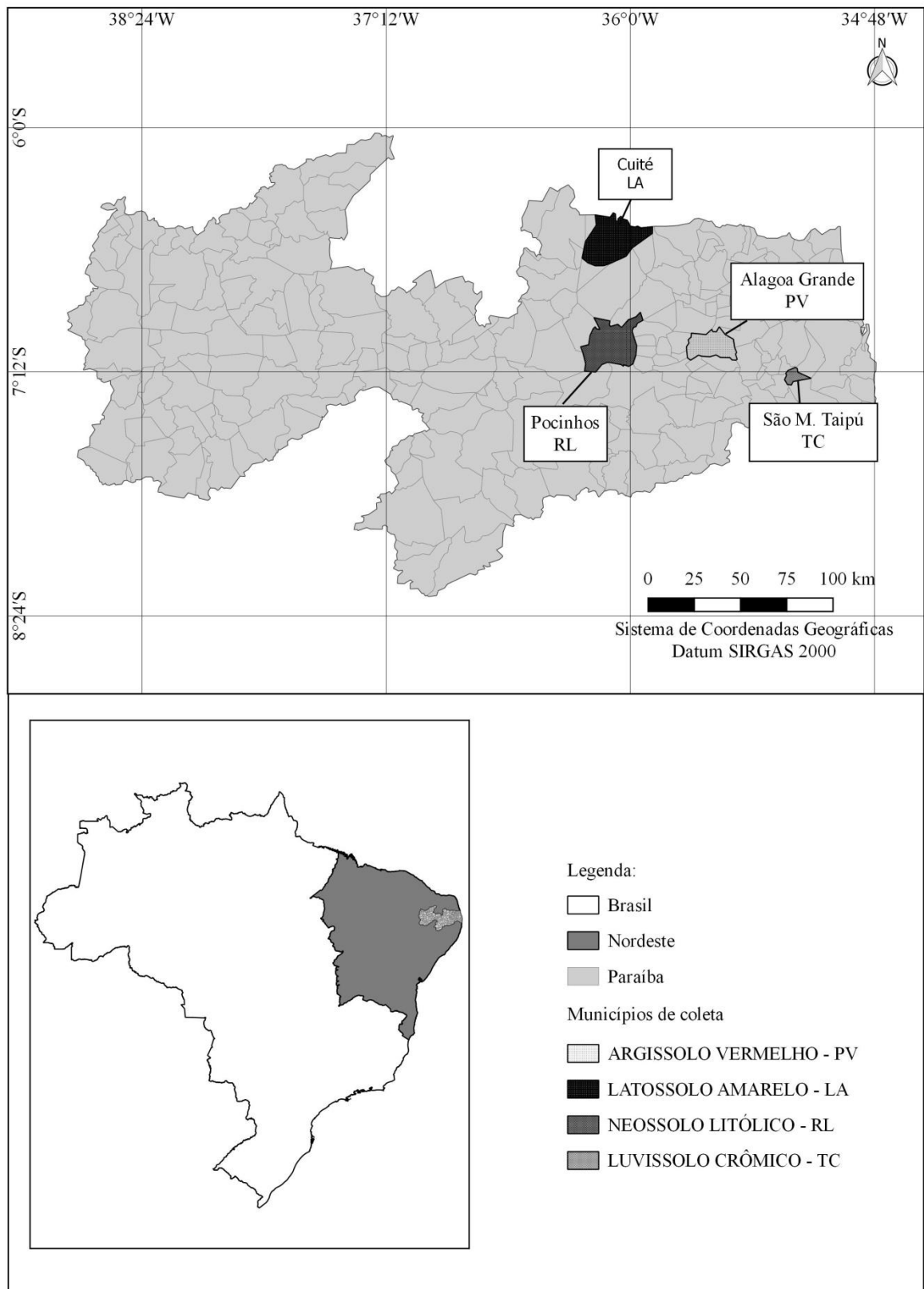


Figura 2. Localizações da coleta das amostras dos solos.

Medeiros (2018), atualizando a classificação do mapa de solos do estado da Paraíba, apresenta dados sobre a representatividade de cada classe de solo, em termos de área e de porcentagem com relação à área total do Estado. Segundo a autora, a classe dos Neossolos Litólicos (RL) ocupa uma área de 21.330,45 Km², cerca de 37,3% da área do estado da Paraíba. A classe dos Argissolo Vermelho (PV) ocupa uma área de 5.012,03 Km², aproximadamente 8,8% da área do território paraibano, seguida pela classe dos Latossolos Amarelos (LA), que ocupa uma área de 263,35 Km² (0,5%), e do Luvisolo Crômico (TC), o qual não foram apresentados dados sobre sua extensão em área.

2.7.1. LATOSSOLO AMARELO Distófico petroplântico (LA)

Classe identificada no município de Cuité-PB, sendo o local de coleta no topo plano da Chapada da Serra do Cuité – PB nas coordenadas geográficas 6°58'32,1" S e 35°43'19,2" O. Esse solo tem como material de origem sedimentos argilo-arenosos e argilosos da Série Serra dos Martins proveniente do Terciário. O relevo local é plano, podendo ocorrer, em nível regional, ondulações muito suaves (Brasil, 1972).

O modelo climático foi classificado como Bsh pela classificação de Köppen (Francisco et al., 2015). A média de precipitação dos últimos 30 anos é de 872,7 mm concentrada entre os meses de Março e Maio, segundo a AESA (2019). A vegetação predominante do local é de floresta subcaducifólia encontrando-se praticamente devastada (Brasil, 1972).

São solos intermediários para Argissolos com gradiente textural > 1,4 e/ou parte do horizonte B (inclusive BA) com estrutura em blocos moderada, e cerosidade pouca e fraca dentro dos 200 cm superficiais, apresentando saturação por base baixa ($V < 50\%$) e boa drenagem (Embrapa, 2013).

A mineralogia da fração areia dessa classe de solo é composta basicamente por quartzos angulosos a subangulosos, as concreções argilosas ocorrem em toda a fração arenosa com um percentual em torno de 1%. Turmalina, magnetita, concreções Fe e biotitas estão presentes como traços em toda a fração arenosa (Monteiro, 2010).

2.7.2. ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto (PV)

Esta classe de solo foi identificada no município de Alagoa Grande-PB, sendo o ponto de coleta das amostras localizado em estrada vicinal do lado direito da PB-079 sentido sede do município de Alagoa Grande, distando em 1,33 km da referida rodovia, nas coordenadas geográficas 7°01'55,4" S e 35°38'48,8" O. Apresenta com material de origem saprólito proveniente do Pré-Cambriano (CD), com destaque para Hornblenda biotita-gnaiss, com influência de material pseudo-autóctone no desenvolvimento do horizonte A. O relevo regional é ondulado com vales em V e de fundo chato e algumas elevações em forma de meia laranja, ocorrendo também relevo forte ondulado (Brasil, 1972).

Localizado na microrregião do Brejo Paraibano, o modelo climático de Koppen foi caracterizado como As (Francisco et al., 2015). A média anual de precipitação dos últimos 30 anos, segunda a AESA (2019), é de 950 mm, concentrada entre os meses de Março e Agosto. A vegetação predominante é composta por pequenas áreas de formações secundárias de floresta subcaducifólia e culturas agrícolas, principalmente milho com muitas gramíneas e leguminosas (Brasil, 1972).

É argiloso e possui cores avermelhadas (bruno avermelhado escuro e vermelho). Como característica morfológica importante, apresenta abundante cerosidade e estrutura em blocos angulares e subangulares, pequenos e muito pequenos, moderada a fortemente desenvolvida, bem como uma relação textural baixa. De acordo com Brasil (1972), possui horizonte B textural não hidromórfico, com argila de atividade baixa ($T < 24 \text{ cmolc/dm}^3$ de argila após correção para carbono), e saturação por bases alta.

Segundo Monteiro (2010), a rocha biotita hornblenda gnaiss apresenta uma mineralogia mais máfica (ricas em ferro e magnésio), O teor de Al_2O_3 encontrado é compatível com a mineralogia da argila com predomínio de caulinita.

2.7.3. NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RL)

Localizado no município de Pocinhos-PB, o ponto de coleta das amostras a se deu a margem direita da BR 412, nas coordenadas geográficas 7° 9'17.59" S e 36° 7'3.10" O. Apresenta como material de origem, o saprolito do gnaiss do Pré-Cambriano, com relevo local plano a suave ondulado. O clima foi classificado por Francisco et al., (2015) pela classificação de Köppen como sendo Bsh, e a precipitação média anual dos últimos 30 anos é de 382,3 mm, concentrada entre os meses de Março e Julho, segundo AESA (2019). A vegetação predominante foi caracterizada por Brasil (1972) como Caatinga Hiperxerófila, arbustiva e pouco densa.

Apresenta, nos 20 cm iniciais, cores bruno avermelhadas (5YR 4/4, úmido e úmido amassado), bruno amarelado (10 YR 5/4, seco e seco pulverizado); textura franco-arenosa com cascalho; estrutura muito fraca pequena a média blocos subangulares; muitos poros muito pequenos e pequenos, poucos médios; ligeiramente duro, muito friável, não plástico não pegajoso; transição gradual e plana. A fração areia composta por 94% de quartzo hialino, vítreo e leitoso, arestados a semi desarestados; 6% de anfibólio; traços de: biotita, concreções argilo humosas, feldspato potássio e detritos: fragmentos de raiz, casca de semente e carvão (Brasil, 1972).

Na mineralogia desse solo, segundo Monteiro (2010), merecem destaque os elevados percentuais de óxidos de ferro, ratificados na análise de fluorescência química, além da presença de hornblenda e biotita, que apresentam Fe na sua composição. O estágio de alteração dos feldspatos contribui para a formação dos minerais de argilas com um percentual elevado de 4,7% de K₂O e 5,2% de CaO. Quanto aos minerais de argila, o solo apresenta domínio de argilas de atividade alta como illita e esmectitas.

2.7.4. LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vertissólico (TC)

Solo identificado próximo ao município de São Miguel de Taipú-PB, sendo as amostras coletadas em área à esquerda da estrada que liga o município de Pilar à BR-230, distando 4,7 km da cidade, nas coordenadas 07°13' 33,6" S e 35°14'12,8" O. Apresenta como material de origem saprolito de gnaise do período pré-cambriano, sendo o relevo local caracterizado como ondulado. O clima, segunda a classificação de Köppen, é As (Francisco et al., 2015), e a precipitação média anual dos últimos 30 anos é 1029,3 mm, concentrada entre os meses de Março e Julho, segundo dados da AESA (2019). A vegetação regional predominante foi caracterizada como remanescentes da floresta caducifólia, formações secundárias, campos antrópicos e culturas agrícolas (Brasil, 1972).

Apresenta nos primeiros 25 cm de solo com coloração bruno avermelhado escuro (5YR 2/2 úmido; 5YR 3/2 úmido amassado e seco; 5YR 3/3 seco pulverizado); textura franco-argilo-arenoso, com cascalho; estrutura fraca pequena a média granular e fraca pequena a media blocos subangulares; muitos poros pequenos; friável, plástico e pegajoso; transição clara e plana (Brasil, 1972). A fração areia deste solo apresentou cerca de 94% de quartzo, cerca de 4% de feldspato e traços de turmalina, hornblenda, muscovita, botita, concreções ferruginosas e concreções argilosas (Monteiro, 2010).

Segundo Monteiro (2010), a mineralogia desse Luvissolo Crômico apresentou uma concentração muito baixa de concreções ferruginosas e argilosas, embora o material de origem seja hornblenda gnaise. No entanto, as condições pedogenéticas não favoreceram a formação de concreções. O feldspato está presente em torno de 5 % na fração areia muito grossa, reduzindo para 3 % na fração areia fina. Os minerais primários biotita e muscovita se apresentam com cerca de 1 % na fração arenosa constituindo reservas de potencial mineral para a fertilidade do solo. O feldspato, do tipo plagioclásio, também está presente na fração argilosa deste solo. Quanto aos minerais de argila foi identificada a illita, que é uma argila de alta atividade.

REFERÊNCIAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Climatologia**. <https://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/climatologia/>. Acesso em: 08 de fev. 2019.

AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 45, p. 848-851, 1981.

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 24, n. 1, p. 141-151, 2000.

AMARAL, B. S. D.; DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; CARVALHO NETO, J.F. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas para o estado da Paraíba. **Rev. Bras. de Geografia Física**, vol. 07, n. 04, p. 691-701, 2014.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 279p.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124-130, 2001.

ARMENISE, E.; SIMMONS, R.W.; AHN, S.; GARBOUT, A.; DOERR, S.H.; MOONEY, S.J.; STURROCK, C.J.; RITZ, K. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 211-219, 2018.

ARMSTRONG, A., QUINTON, J. N., HENG, B. C. P., CHANDLER, J. H. Variability of interrill erosion at low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 1, p. 97-106, 2011.

ASADI, H.; GHADIRI, H.; ROSE, C.W.; ROUHIPOUR, H. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 711-724, 2007.

ASNER, G.P.; ELMORE, A.J.; OLANDER, L.P.; MARTIN, R.E.; HARRIS, A.T. Grazing systems, ecosystem responses, and global change. **Annual Review Environmental and Resources**, v. 29, p. 261-299, 2004.

ASSOULINE, S. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models and solutions. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 2, p. 570-591, 2004.

BAKKER, M.; GOVERS, G.; VAN DOORN, A.; QUETIER, F.; CHOUVARDAS, D.; ROUNSEVELL, M. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe. The importance of landscape pattern. **Geomorphology**, v. 98, n. 3-4, p. 213-226, 2007.

BARROS, S.H.A. **Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na Engenharia Rodoviária**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

BASTOS, B.C.A.; DIAS, R.D.; Y. GEHLING, J.M.W.Y.; MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Práticas da Engenharia Civil**, n. 2, p. 9-18, 2001.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 31, n. 1, p. 133-142, 2007.

BERTOL, I.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V.; CARRAFA, M.R. Nutrients losses by water erosion. **Science Agricultural**, v. 60, p. 581-586, 2003.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7 ed. São Paulo: Ícone, 2010. 355 p.

BEZERRA, S. A.; BARROS CANTALICE, J. R.; CUNHA FILHO, M.; SILVA SOUZA, W. L. D. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um Cambissolo do Semiárido do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 34, n. 4, p. 1325-1332, 2010.

BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E.; REMLEY, P. A. Interrill soil erosion processes: I Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.51, p.1566-1571, 1987.

BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M. A.; MENEZES, S. J. M. C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 30, p. 13-21, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisa e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **I. Levantamento exploratório de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

BRYAN, R.B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, v. 32, p. 385-415, 2000.

CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; OLIVEIRA, O.F.L.; MELO, R.O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividade e doses de cobertura morta. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 68-74, 2009.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 685-690, 2004.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 117-124, 2003.

DALLA ROSA, J.; COOPER, M.; DARBOUX, F.; MEDEIROS, J. C. Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 37, p. 400-410, 2013.

DEFERSHA, M. B.; QURAISHI, S.; MELESSE, A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 7, p. 2367-2375, 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2013. 353 p.

FAO; ITPS - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS AND INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS. **Status of the world's soil resources (SWSR): Main Report**. Rome, FAO and ITPS, 2015. 650 p.

FARRES, P. J. Role of aggregate size and time in the soil crusting process. **Earth Surf. Process**, v. 3, p. 243-254, 1978.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. United States Department of Agriculture - Erosion USDA: **Water Erosion Prediction Project**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory - NSERL, 1995. (Technical Documentation, 10).

FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOTT, W. J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2542-2550, 2009.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. *In*: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, p. 297-380, 1982.

FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; NEIBLING, W. H. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 133-139, 1985.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. *In*: HAAN, C.T. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 297-380. (ASAE Monograph, 5).

FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; RÖMKENS, M. J. M.; ONSTAD, C. A. Processes of soil erosion by water. *In*: FOLLET, R.F.; STEWART, B.A., (Eds.) **Soil erosion and crop productivity**. Soil Science Society of America, 1985. p.137-158.

FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y. A process-based analysis of the influence of aggregate stability on surface crusting, infiltration, and interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 62, p. 717-724, 1998.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; SANTOS, D.; MATOS, R. M. Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Rev. Bras. de Geografia Física**, v. 8, p. 1006-1016, 2015.

FRANCO, A. M. P.; CASSOL, E. C.; PAULETTO, E. A.; INDA, A. V. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. Agrociência**, v. 18, n. 2-4, p.175-187, 2012.

FU, S.; LIU, B.; LIU, H.; XU, L. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. **Catena**, v. 84, p. 29-34, 2011.

GOVERS, G.; GÍMENEZ, R.; OOST, KRISTOF VAN. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. **Earth-Science Reviews**, v. 84, p. 87-102, 2007.

HARTANTO, H.; PRABHU, R.; WIDAYAT, A.S.E.; ASDAK, C. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. **Forest Ecology and Management**, v. 180, p. 361-374, 2003.

HU, X.; LIU, L. Y.; LI, S. J.; CAI, Q. G.; LÜ, Y. L.; GUO, J. R. Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide. **Pedosphere**, v. 22, p. 415-424, 2012.

HUANG, Chi-hua; BRADFORD, J. M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.57, n.5, p.1176-1183, 1993.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. New York: Cornell Univ. Press, 1971. 320 p.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 3 ed. Ames: State University Press, 1995. 391 p.

ISIKWUE, M.; OCHEME, J.; AHO, M. Evaluation of rainfall erosivity index for Abuja, Nigeria using Lombardi method. **Niger. J. Technol.**, v. 34, n. 56. 2015.

KESSTRA, S.; PEREIRA, P.; NOVARA, A.; BREVIK, E. C.; AZORIN-MOLINA, C.; PARRAS-ALCÁNTARA, L.; JORDÁN, A.; CERDÀ, A. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. **Sci. Total Environ.**, v. 551-552, p. 357–366, 2016.

KINNEL, P. I. A. Simulations demonstrating interaction between coarse and fine sediment loads in rain-impacted flow. **Earth Surface Processes**, v. 31. p. 355-367, 2006.

KINNELL, P. I. A. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 2815-2844, 2005.

KUHN, N. J.; BRYAN, R. B. Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontário soils. **Catena**, v. 57, p. 113-133, 2004.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European J. Soil Sci.**, v. 47, p. 425-437, 1996.

LE BISSONNAIS, Y.; RENAUX, B.; DELOUCHE, H. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. **Catena**, v. 25, p. 33-46, 1995.

LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M. J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 57, p. 224-229, 1993.

LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; LECOMTE, V.; BENKHADRA, H.; SOUCHERE, V.; MARTIN, P. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. **Catena**, v. 62, p. 111-124, 2005.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficinas de Textos. 2002, 178p.

LEVY, G. J.; LEVIN, J.; SHAINBERG, I. Seal formation and interrill soil erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p. 203-209, 1994.

LIGONJA, P. J.; SHRESTHA, R. P. Soil erosion assessment in Kondoa eroded area in Tanzania using universal soil loss equation, geographic information systems and socioeconomic approach. **Land Degrad. Dev.**, v. 26, p. 367–379, 2015.

LIU, Q. Q.; XIANG, H.; SINGH, V. P. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 469-486, 2006.

LOCH, R. J. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface seal development. **Australian J. Soil Sci.**, v. 32, p. 687-700, 1994.

McINTYRE, D. S. Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Sci.**, v. 58, p. 185-189, 1958.

MEDEIROS, B. M. **Atualização da classificação do mapa de solos da Paraíba**. 2018. 38f. il. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2018.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. **Projeto de monitoramento ambiental de microbacias hidrográficas** – RS-RURAL, subprojeto 7. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 2003. 89p.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; RÖMKENS, M. J. M. Source of soil eroded by water from upland slopes. *In*: UNITED STATES. Department of Agriculture. Agriculture Research Service. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington, 1975. p. 177-189. (USDA. ARS-S, 40).

MINELLA, J P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 31, p. 1637-1646, 2007.

MONTEIRO, A. L. **Caracterização mineralógica de solos representativos do Estado da Paraíba**. 2010. 116f. il. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Programa de Pós Graduação Manejo de Solo e Água, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

MOORE, D. C.; SINGER, M. J. Crust formation effects on soil erosion processes, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 54, p. 1117-1123, 1990.

MORGAN, R. P. C. **Soil conservation**. London: Longman Limited, 2 ed. 1996, 198 p.

NUNES, M. C. M. **Erosão hídrica em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul**. 2006, 147f. il. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, p. 2839-2845, 2008.

OLIVEIRA, J. P. B.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Assessing the use of rainfall synthetic series to estimate rainfall erosivity in Brazil. **Catena**, v. 171, p. 327-336, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2013.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil Tillage Research**, v. 73, p. 119-129, 2003.

PROSDOCIMI, M.; JORDÁN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÀ, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Sci. Total Environ.**, v. 547, p. 323-330, 2016.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFGV, 2004. 87p.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO**. 2003, 242f. il. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.

REICHERT, J. M.; NORTON, L. D. Surface seal micromorphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. **Soil Technol.**, v. 7, p. 303-310, 1995

REICHERT, J. M.; NORTON, L. D.; HUANG, C. Sealing amendment, and rain intensity effects on erosion of high-clay soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p. 1199-1205, 1994.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 16, p. 289-298, 1992.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1995. 304 p.

RIBEIRO, M. R.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GALINDO, I. C. L. Os solos e o processo de desertificação no semi-árido brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 6, p. 413-460, 2009.

SALA, O. E.; CHAPIN F. S.; CHAPIN, M. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, v. 287, p. 1770-1774, 2000.

SHI, Z. H.; FANG, N. F.; WUB, F. Z.; WANGA, L.; YUE, B. J.; WUA, G. L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 123-130, 2012.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259. 2004.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, C. J.; FERREIRA, M. F. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 33, n. 6, p. 1811-1820, 2009.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p.1207-1220, 2000.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. **Sediment transport technology**: water and sediment dynamics. Littleton: Water Resources Publication, 1992. 897p.

SINGH, M. J.; KHERA, K. L. Nomographic estimation and evaluation of soil erodibility under simulated and natural rainfall conditions. **Land Degradation & Development**, v. 20, p. 471-480, 2009.

SMITH, D. D.; WISCHMEIER, W. H. Rainfall erosion. *In*: Advances in Agronomy, 1962. v.14, p. 109-148.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; VAUCLIN, M. Effect of crusting on the physical and hydraulic properties of a soil cropped with Castor beans (*Ricinus communis* L.) in the Northeastern region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 141, n. 8, p. 55-61, 2014.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. **Soil erosion**: processes, prediction, measurement, and control. New York: John Wiley & Sons, 2002. 337p.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2016.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 54, p. 1385-1392, 1990.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004. 943p.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, v. 55, n. 3-4, p. 225-245, 1992.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea-estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, n. 4, p. 1713-1722, 2008.

WALTRICK, P. C.; MACHADO, M. A. M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no Estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 39, p. 256-267, 2015.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 33, n. 1, p. 131-137, 1969.

WISCHMEIR, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 58 p. 1978. (Agriculture Handbook, 537)

ZHANG, C.; NEARING, M. A.; GARBRECHT, J. D.; STEINER, J. L. Downscaling monthly forecasts to simulate impacts of climate change on soil erosion and wheat production. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 68, p. 1376-1385, 2004.

ZHOU, J.; FU, B.; GAO, G.; LÜ, Y.; LIU, Y.; LÜ, N.; WANG, S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 137, p. 1–11, 2016.

CAPÍTULO I

**Escoamento superficial e erodibilidade em entressulcos de solos representativos da
Paraíba**

RESUMO

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. **Escoamento superficial e erodibilidade em entressulcos de solos representativos do estado da Paraíba.** Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Fevereiro de 2019. Cap. I. 38 p.il. Tese. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

A erosão hídrica do solo, além da degradação ambiental, traz prejuízos a produção de alimentos, fibras e energia na ordem de US \$150 bilhões por ano, só para a reposição dos nutrientes do solo, ao passo que reduz em 0,3% ao ano a produção agrícola mundial, podendo chegar a 10% até 2050. Diante disso, com o intuito de auxiliar o desenvolvimento de estratégias de preservação do solo e contenção desse tipo de erosão, o presente trabalho objetivou: I) determinar as variáveis hidráulicas do escoamento superficial, as perdas totais de solo (PS_i), a taxa máxima de desagregação (D_i) e o fator de erodibilidade do solo em entressulco (K_i); II) estabelecer correlações entre propriedades físicas e químicas dos solos com o K_i , com o intuito de desenvolver um modelo matemático para sua predição; III) aplicar modelos existentes na literatura para estimativa indireta do K_i e avaliar sua aplicabilidade para os solos desse estudo. Foram avaliados quatro solos: Latossolo Amarelo (LA); Argissolo Vermelho (PV); Neossolo Litólico (RL); e Luvisso Crômico (TC). O critério de seleção teve como base o grau de desenvolvimento pedogenético. Em laboratório conduziram-se os experimentos de erosão em entressulcos sob chuva simulada, com solo descoberto e declividade da parcela de $0,10 \text{ mm}^{-1}$. Os testes foram realizados em parcelas experimentais, com área útil de $0,3481 \text{ m}^2$, onde efetuou-se ensaios com chuvas simuladas, com intensidade média ajustada em 85 mm h^{-1} , durante 75 minutos. Foram avaliadas taxas de perdas de solo, concentração de sedimentos em suspensão, vazão, taxa de desagregação do solo e caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento. O regime de escoamento em todos os solos foi caracterizado como laminar lento ou subcrítico ($Re < 500$ e $Fr < 1$), assim como os valores de descarga líquida na ordem de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e altura de lâmina 10^{-4} m , indicaram ocorrência de erosão em entressulcos. O fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) dos solos LA, PV, RL e TC foram de $3,54 \times 10^6$; $3,69 \times 10^6$; $3,41 \times 10^6$ e $1,60 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, respectivamente. As características físicas e químicas de cada solo apresentaram influência mais direta no entendimento do comportamento das variáveis hidráulicas do escoamento superficial e da erodibilidade em entressulco do que o grau de desenvolvimento pedogenético. Dos solos avaliados, o Luvisso Crômico (TC), mesmo sendo menos desenvolvido, apresentou-se o mais estável, com os menores PS_i , D_i e K_i . Os modelos existentes aplicados para estimativa indireta do K_i não se adequaram para todos os solos avaliados. O modelo sugerido nesse estudo propõe a utilização dos valores do diâmetro médio ponderado de agregados, obtidos via peneiragem úmida ($DMPA_U$), e o óxido de ferro de baixa cristalinidade, obtido por extração com oxalato de amônio ácido (Fe_o) para estimativa do K_i em solos com as mesmas características dos solos avaliados.

Palavras Chave: Erosão hídrica, região semiárida, chuva simulada, desenvolvimento pedogenético, propriedades do solo.

ABSTRACT

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. **Surface flow and interrill erodibility in representative soils of Paraíba state.** Areia - PB, Agricultural Science Center, UFPB, February 2019. Cap. I. 38f. il. Thesis. Postgraduate Program of Soil Science. Advisor: Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

Soil erosion, in addition to environmental degradation, damages the production of food, fiber and energy in the order of US \$ 150 billion per year, only for the replacement of soil nutrients, while reducing by 0.3% per year world agricultural production, and could reach 10% by 2050. Therefore, in order to assist in the development of soil preservation strategies and containment this type of erosion, the present study aimed to: I) determine the hydraulic variables of the runoff, the total soil losses (PSi), the maximum rate of disaggregation (D_i) and the soil interrill erodibility factor (K_i); II) Establish correlations between physical and chemical properties of soils and K_i , in order to determine a mathematical model for their prediction; III) apply existing models for indirect estimation of K_i and evaluate its applicability to the soils of this study. Four soils were evaluated: Ferralsol (FR); Acrisol (AC); Leptosol (LP); Luvisol (LV). The selection criterion was based on the degree of pedogenetic development. The interrill erosion experiments were conducted under simulated rainfall, under laboratory conditions, with uncovered soil and plot slope of 0.10 mm^{-1} . The tests were carried out in experimental plots, with a useful area of $0,3481 \text{ m}^2$, where it was carried out tests with simulated rains, with mean intensity adjusted to 85 mm h^{-1} for 75 minutes. Soil loss rates, suspended sediment concentration, flow rate, soil disaggregation rate and characterization of hydraulic flow variables were evaluated. The flow regime in all soils was characterized as slow or shallow laminar flow ($Re < 500$ and $Fr < 1$), as well as the liquid discharge amounts of the order of $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and laminar flow height of 10^{-4} m , indicate occurrence of interrill erosion. Interrill erodibility (K_i) of FR, AC, LP and LV soils was $3,54 \times 10^6$; $3,69 \times 10^6$; $3,41 \times 10^6$ and $1,60 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, respectively. The physical and chemical characteristics of each soil had a more direct influence in the understanding of the behavior of hydraulic variables of the surface runoff and the interrill erodibility than the degree of pedogenetic development. Among the evaluated soils, Luvisol (LV), although one of the least developed soils, was the most stable, with the lowest PSi, D_i and K_i values. The existing models applied for indirect estimation of K_i were not adequate for all evaluated soils. The model suggested in this study proposes the use of the weighted average diameter of aggregates, obtained through wet sieving ($DMPA_U$), and the iron oxide of low crystallinity obtained by extraction with acid ammonium oxalate (Fe_o) to estimate K_i in soils with the same characteristics of the evaluated soils.

Keywords: Water erosion, semi-arid region, rainfall simulation, pedogenetic development, soil properties.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo é considerada uma crise ambiental global que ameaça o meio ambiente e a agricultura, uma vez que os solos são um recurso natural de grande importância para a produção mundial de alimentos, fibras e energia para uso e consumo humano. Além disso, o crescimento populacional vem diminuindo a área de terra cultivável e a produtividade está sendo diminuída pela degradação do solo, inclusive por práticas agrícolas inadequadas (Koiter et al., 2017; Vaezi et al., 2018).

A erosão do solo pela água induz fluxos anuais de perda de 23-42 Mt (megatoneladas) de nitrogênio e 14,6-26,4 Mt de fósforo em terras agrícolas, podendo ser comparadas às taxas anuais de aplicação de fertilizantes, que são 112 Tg (teragramas) de N e 18 Tg de P. Essas perdas precisam ser repostas via fertilização a um custo econômico significativo, podendo atingir a cifra de US \$150 bilhões. Se o valor mediano de perda de safra anual de 0,3% for válido para o período de 2015 a 2050, uma redução total de 10,25% na produção agrícola poderia ser projetada para 2050 (FAO & ITPS, 2015).

Em regiões mais pobres, os recursos econômicos para obter compensações pelas perdas de nutrientes não existem, e como consequência, a remoção de nutrientes pela erosão de campos agrícolas é muito maior que a quantidade de fertilizante aplicada (FAO & ITPS, 2015). As áreas de clima semiárido, que cobrem cerca de 24% da superfície mundial, são consideradas umas das mais vulneráveis aos impactos dos processos de erosão hídrica, tanto por fatores edafoclimáticos e práticas agrícolas comumente adotadas como por fatores socioeconômicos, sendo essa erosão o fator mais importante na degradação da terra ou na desertificação dessas áreas, e é por isso que as estratégias de restauração precisam ser desenvolvidas e aplicadas (Ligonja and Shrestha, 2015; Keesstra et al., 2016; Prosdocimi et al., 2016; Zhou et al., 2016).

Nas áreas de clima semiárido, de forma generalizada, os solos são geralmente rasos, mal estruturados e com baixo teor de matéria orgânica, e a cobertura vegetal associada é frequentemente insuficiente para proteger a superfície, especialmente quando as práticas agrícolas de cultivo e pastagem reduzem ainda mais essa cobertura (Cammeraat et al., 2010). No Nordeste brasileiro, onde está inserido a maior parte do semiárido nacional, o processo de desertificação está associado ao conjunto de condições geoambientais, bem como substrato rochoso, solos, feições geomorfológicas, vegetação e clima. As consequências dessa degradação advêm tanto de causas naturais como também de intensas explorações socioeconômicas, tais como: desmatamento, queimadas, selamento superficial do solo, superpastoreio de bovinos, caprinos, ovinos, entre outros. Com o desenvolvimento

das atividades agropecuárias, o crescimento da cobertura vegetal é limitado, expondo os solos às intempéries naturais (Santos & Aquino, 2017).

A compreensão das relações envolvidas no processo de erosão hídrica do solo é o principal objetivo de todos que lidam com os problemas causados por esse fenômeno, como a redução do rendimento das culturas através da remoção de matéria orgânica e de nutrientes presentes na camada superficial do solo, a contaminação de solo e da água através do carreamento de insumos agrícolas, e o assoreamento de cursos d'água e reservatórios pela deposição de partículas do solo oriundas do destacamento e transporte pela ação do fluxo de água (Foster et al., 1985; Bertol et al., 2003; Vaezi & Bahrami, 2014; Montanarella et al., 2016).

O processo de erosão hídrica pode ser dividido em erosão em entressulcos e em erosão em sulcos. A erosão em entressulcos é causada, principalmente, pela desagregação das partículas do solo devido ao impacto da gota da chuva e transporte pelo escoamento superficial em fluxo laminar lento. A erosão em sulcos é devida à desagregação, transporte e deposição das partículas do solo pelo escoamento concentrado em canais discerníveis (Meyer et al., 1975; Alberts et al., 1995; Jayawardena & Bhuiyan, 1999).

Segundo Foster (1982), a suscetibilidade de um solo em erodir, ou a resistência do solo à erosão, é chamada de erodibilidade, sendo portanto, função de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A erodibilidade é geralmente considerada como uma propriedade inerente do solo com um valor constante que reflete o fato de que diferentes solos erodem a taxas diferentes quando os outros fatores que afetam a erosão são constantes (Brevik et al., 2015).

Nesse contexto, a erodibilidade do solo corresponde à sensibilidade do material da superfície ao desprendimento e transporte pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo laminar, descrevendo o grau em que a superfície do solo é suscetível à erosão hídrica, sendo um parâmetro importante para estimar as perdas de solo, e em conjunto com a verificação das principais fontes de erosão em uma área, constitui uma base sólida para escolha de estratégias adequadas para o controle da erosão e implementação de práticas conservacionistas (Algayer et al., 2014; Auerswald et al., 2014; Wang et al., 2014).

A erosão do solo pela água envolve a interação de um conjunto complexo de processos físicos e químicos governados por muitos fatores (Wang et al., 2016). Entre os atributos do solo que condicionam a erodibilidade entressulcos, destacam-se a distribuição de partículas (granulometria), os teores de óxidos de ferro e alumínio, quantidade de matéria orgânica, a mineralogia da fração argila, a estrutura do solo e a estabilidade dos

agregados, sendo esses dois últimos de principal importância (Fristensky & Grismer, 2009; Franco et al., 2012).

É fundamental entender o papel da estrutura do solo na resistência à erosão hídrica e sua relação com outras propriedades importantes do solo (Vaezi et al., 2018). O tamanho e a estabilidade dos agregados influenciam uma ampla gama de propriedades do solo, incluindo acúmulo de matéria orgânica, porosidade do solo, infiltração de água, aeração, compactação, selamento superficial e formação de crostas, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência à erosão hídrica, sendo possível por meio dessas propriedades a estimativa da susceptibilidade do solo à erosão hídrica. (Díaz-Zorita et al., 2002; Dalla Rosa et al., 2013; Cheng et al., 2015; Pulido Moncada et al., 2015).

A determinação da erodibilidade do solo em entressulcos em condições controladas, com aplicação de chuva simulada, pode se tornar dispendiosa e demandar tempo, e em nível de campo, as dificuldades podem ser ainda maiores (Albuquerque et al., 2000). Alternativamente ao método padrão de determinação da erodibilidade do solo, métodos indiretos foram desenvolvidos utilizando atributos dos solos, os quais vários autores têm estudado buscando relações com a suscetibilidade à erosão (Schick et al., 2014).

As vantagens do uso de métodos analíticos são a rapidez e o menor custo na determinação da erodibilidade dos solos em comparação aos métodos diretos, pois permitem a estimativa do valor de K através de atributos obtidos por análises laboratoriais que podem ser facilmente realizadas, sendo uma alternativa mais viável em relação ao método inicialmente proposto para sua quantificação, que além de muito caro e lento, requer muito tempo para obter dados definitivos sobre o solo (Silva et al., 2007; Cassol et al., 2018). Avaliando a utilização da estabilidade dos agregados do solo como indicador de erodibilidade entressulcos em solos da China, Ding & Zang (2016) afirmaram que uma simples determinação laboratorial pode fornecer dados que se correlacionam de perto com aqueles resultantes de investigações de campo, que são mais caras e/ou demoradas.

O desenvolvimento e, ou, aprimoramento dos métodos indiretos de determinação da erodibilidade do solo, carecem no Brasil, de valores de referência que tenham sido obtidos de acordo com metodologias de avaliação direta (chuva natural ou simulada), permitindo assim a validação dos métodos alternativos, evitando-se possíveis erros causados pelo uso de metodologias desenvolvidas para outras regiões, uma vez que os métodos desenvolvidos nos EUA se evidenciaram inadequados às condições brasileiras, bem como os desenvolvidos no Brasil ainda apresentam limitações ao seu uso generalizado, devido a existência de muitas classes brasileiras de solos e, dentro de cada classe, diferenças no

valor do fator K, atribuídas aos fatores de formação, material de origem do solo, a predominância climática no local e as condições de uso da terra (Sachis et al., 2008; Martins et al., 2011; Schick et al., 2014; Cassol et al., 2018), além da baixa representação numérica e espacial dos dados.

Diante do exposto, e partindo-se das hipóteses de que: 1) solos com diferentes graus de desenvolvimento pedogenético devem apresentar comportamentos distintos quanto à erosão hídrica, em que os mais desenvolvidos devem, em teoria, apresentar-se mais resistentes a erosão do que os menos desenvolvidos; e que: 2) as equações existentes na literatura não se aplicam de forma adequada para determinar a erodibilidade em entressulcos nos solos avaliados, os objetivos deste trabalho foram: I) determinar em quatro classes de solo presentes no estado da Paraíba, com diferentes graus de desenvolvimento pedogenético, as variáveis hidráulicas de escoamento e a erodibilidade dos solos em entressulcos a partir da simulação de chuvas em ambiente controlado; II) estabelecer relações entre as propriedades intrínsecas de cada solo com a sua erodibilidade, a fim de gerar uma equação que possa determinar, de forma indireta, valores de erodibilidade em entressulcos para os solos avaliados; III) aplicar equações existentes na literatura para determinação da erodibilidade em entressulcos dos solos, com a finalidade de comparar com os valores obtidos de forma direta para determinar a sua eficácia e aplicabilidade para os solos avaliados.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Rural, localizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba. Foram utilizadas amostras de quatro solos que fazem parte do Banco de Solos Representativos do Estado da Paraíba (Oliveira et al., 2006), selecionados de acordo com as diferentes classes, sua representatividade e grau de desenvolvimento pedogenético (Tabela 1), sendo eles: LATOSSOLO AMARELO Distófico petroplântico (LA), ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abruptico (PV), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RL) e LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vertissólico (TC). As amostras foram coletadas em campo, na camada superficial de 0-20 cm de profundidade, em locais georreferenciados, em condições de conservação mais próximas ao natural, ou sem cultivo agrícola.

Tabela 1. Classes de solo, localização de coleta, vegetação predominante, relevo, média de precipitação anual, formação geológica e litologia, mineralogia e índice de intemperismo dos solos avaliados

Variáveis	Solos ⁽¹⁾			
	Mais desenvolvidos ⁽⁶⁾		Menos desenvolvidos ⁽⁶⁾	
	LA	PV	RL	TC
Perfil ⁽²⁾	4	23	53	30
U.M. ⁽²⁾	LVe1	TRe1	SS2	NC4
Microrregião Geográfica / Cidade ⁽²⁾	Curimataú Ocidental / Cuité	Guarabira / Alagoa Grande	Curimataú Ocidental / Pocinhos	Sapé / São Miguel de Taipú
Vegetação ⁽²⁾	Floresta Subcaducifólia	Floresta Subcaducifólia	Caatinga Hiperxerófila Plano a suavemente ondulado	Floresta Caducifólia
Relevo ⁽²⁾	Plano	Ondulado		Ondulado
Precipitação e Concentração das chuvas ⁽⁴⁾	872,7 mm Março a Maio	950,0 mm Março a Agosto	382,3 mm Março a Julho	1029,3 mm Março a Julho
Classificação de Köppen ⁽⁵⁾	Bsh	As	Bsh	As
Formação geológica e litologia ⁽²⁾	Terciário / Sedimentos da Série Serra do Martins	Pré-Cambiano (CD) / Hornblenda-biotita-gnaiss	Pré-Cambiano / Gnaiss.	Pré-Cambiano (CD) / Hornblenda-gnaiss.
Minerais ⁽³⁾	Ct, Gt	Ct, Gt, Mi, Hm	Mi, Ct, (2:1)	Ct, Mi, (2:1), Fp
Ki (SiO₂/Al₂O₃) ⁽²⁾	2,16	2,25	2,93	3,42

Fontes: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); ⁽²⁾ Brasil (1972); ⁽³⁾ Dados apresentados por Farias et al. (2009) na ordem de sua predominância na fração argila do solo; ⁽⁴⁾ Dados obtidos pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - AESA (2019); ⁽⁵⁾ Classificação realizada por Francisco et al. (2015). Legenda: U.M.= Unidade de Mapeamento; Ki (SiO₂/Al₂O₃) = Índice de intemperismo; LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; Ct = caulinita; Gt = goethita; Mi = mica; Hm = hematita; (2:1) = argilomineral tipo 2:1; Fp = feldspatos; ⁽⁶⁾ Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46; Solos menos desenvolvidos: Ki > 2,46.

Caracterização física, química e mineralógica dos solos

A caracterização física e química dos solos avaliados (Tabela 2) foi realizada seguindo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Além do índice de estabilidade de agregados proposto na metodologia citada (IEA_T), obtido através da relação entre os diâmetros médios ponderados dos agregados obtidos por via úmida e seca (DMPA_U/DMPA_S), o índice de estabilidade de agregados também foi determinado através da equação proposta por Cesário et al. (2010), desenvolvida a partir da análise crítica das equações propostas por Castro Filho (1998) e Hillel (2003).

Tabela 2. Características físicas e químicas dos solos avaliados

Variáveis	Solos ⁽¹⁾			
	Mais desenvolvidos ⁽⁵⁾		Menos desenvolvidos ⁽⁵⁾	
	LA	PV	RL	TC
Físicas ⁽²⁾				
Areia Total (g kg ⁻¹)	627 b	548 b	795 a	798 a
Areia muito grossa (g kg ⁻¹)	27 b	18 b	19 b	133 a
Areia grossa (g kg ⁻¹)	110 b	54 c	135 b	242 a
Areia média (g kg ⁻¹)	223 ab	128 c	256 a	206 b
Areia fina (g kg ⁻¹)	218 b	263 a	283 a	160 c
Areia muito fina (g kg ⁻¹)	49 c	85 b	102 a	57 c
Silte (g kg ⁻¹)	188 a	124 b	120 b	102 b
Argila (g kg ⁻¹)	185 b	328 a	85 c	100 c
Argila Dispersa H ₂ O (g kg ⁻¹)	34,6 ab	45,1 a	20,4 c	23,7 bc
Grau de Floculação (%)	81 a	86 a	76 a	76 a
Densidade do Solo (kg dm ⁻³)	1,42 c	1,46 bc	1,62 a	1,51 b
Densidade de Partículas (kg dm ⁻³)	2,52 a	2,58 a	2,44 a	2,63 a
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,44 a	0,43 a	0,34 b	0,43 a
DMPA _U	1,11 b	0,63 c	0,44 c	1,66 a
DMPA _S	1,76 b	2,57 a	1,19 c	1,89 b
IEA _T (%)	63,4 b	24,5 d	37,3 c	87,7 a
IEA _C (%)	62,1 a	33,9 b	20,4 b	64,1 a
Químicas ⁽³⁾				
pH (H ₂ O)	5,90	5,00	6,20	6,20
C.O. (g kg ⁻¹)	5,90	8,00	3,80	7,60
P (mg dm ⁻³)	11,42	2,32	4,31	4,35
K (cmol _c dm ⁻³)	0,18	0,19	0,19	0,64
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,60	1,90	2,00	6,10
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,15	0,80	1,10	4,00
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,11	0,04	0,25	0,10
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,32	0,05	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,14	4,28	2,29	2,90
CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	5,18	7,20	5,83	13,74
Saturação por Bases (V %)	59,00	41,00	61,00	79,00
Saturação por Alumínio (m %)	0,00	10,00	1,00	0,00
Fe _o (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,25	0,25	0,66	0,79
Fe _d (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	7,63	7,63	2,13	4,69
Al _o (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,33	0,33	0,16	0,33
Al _d (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	1,12	1,12	0,21	0,38

Fontes: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); ⁽²⁾ Obtido a partir das bases de dados apresentadas por Pequeno (2016) para LA, PV e RL, e por Freitas (2016) para TC; ⁽³⁾ Dados apresentados por Farias et al. (2009); ⁽⁴⁾ Dados apresentados por Santos et al. (2011). Legenda: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; Areia Total (2-0,053 mm); AMG = Areia muito grossa (2-1 mm); AG = Areia grossa (1-0,5 mm); AM = Areia média (0,5-0,25 mm); AF = Areia fina (0,25-0,106 mm); AMF = Areia muito fina (0,106-0,053 mm); Silte (0,053-0,002 mm); Argila (< 0,002 mm); DMPA_U = Diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via peneiragem úmida; DMPA_S = Diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via peneiragem seca; IEA_T = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Teixeira et al. (2017); IEA_C = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Cesário et al. (2010); C.O. = Carbono Orgânico; Fe_o e Al_o = Óxidos de ferro e alumínio extraídos com oxalato de amônio ácido; Fe_d e Al_d = Óxidos de ferro e alumínio extraído com ditionito-citrato-bicarbonato. ⁽⁵⁾ Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46; Solos menos desenvolvidos: Ki > 2,46. Médias seguidas de mesmas letras, em linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tomando como padrão o limite superior da areia fina (0,2 mm), Cesário et al. (2010) propuseram descontar somente as areias que ficaram retidas na peneira de 0,25 mm e nas peneiras menores, que assim são considerados “falsos agregados”, e não, como propôs Hillel (2003), descontar a areia de todas as classes, havendo um entendimento por parte dos autores de que as partículas de areia, que após o peneiramento não se desprenderam e permaneceram “aderidas” na massa de agregados, não devem ser descontadas, estando sob alguma circunstância unida ao agregado, fazendo parte de sua funcionalidade, sugerindo nesse sentido o seguinte cálculo (Equação 1):

$$EA = \frac{PAS - (P25 - \text{Areia})}{PAS - \text{Areia}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: EA é a estabilidade de agregados (%); PAS é o peso da amostra seca (g); P25 é o peso da massa de agregados menores que 0,25 mm (g); Areia é o peso da areia retida nas classes menores que 0,25 mm (g).

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em solo descoberto. Os materiais dos solos coletados foram destorroados e passados em peneiras com abertura de malha de 10 mm e posteriormente secos ao ar.

As parcelas experimentais foram construídas com material em acrílico e montadas sobre uma estrutura metálica, com área útil de 0,3481 m², com dimensões de 0,59 m por 0,59 m e altura de 0,10 m, com bordadura lateral de 0,20 m de largura. O volume da parcela experimental foi preenchido com uma camada de 3 cm de espessura de brita, sobre a qual foi colocada uma camada de 1 cm de areia com diâmetro 0,25mm, uma tela de plástico com malha de 1 mm e uma camada de solo com 6 cm de espessura, para uma densidade de empacotamento (Dep) de 1,2 g cm⁻³.

Os materiais de solo nas parcelas foram saturadas com antecedência de 24 horas, mediante um conjunto de seis mangueiras acopladas ao fundo da parcela, conectadas a um reservatório de água posicionado a uma altura levemente superior ao topo da parcela experimental. Ao iniciar os testes com chuva, aplicou-se uma tensão de água equivalente a 60 cm de coluna d'água (60 cca), a qual foi mantida durante a aplicação do ensaio. A declividade das parcelas experimentais foi de 0,10 m m⁻¹.

Chuvas simuladas

As chuvas simuladas foram efetuadas utilizando-se simulador de chuvas, semelhante ao descrito por Meyer & Harmon (1979), com um bico aspersor tipo Veejet 80-100 com diâmetro interno de 12,7 mm situado a 3,1 m acima da superfície da parcela, operando com uma pressão constante de 41 kPa na saída de água do bico. Em todos os ensaios, foram aplicadas chuvas simuladas com três repetições para cada solo, com intensidade média ajustada em 85 mm h⁻¹ durante 75 minutos.

As intensidades médias das chuvas foram determinadas através de um conjunto de pluviômetros, colocados ao acaso ao lado da área útil das parcelas experimentais. As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram obtidas pela pesagem do material coletado em potes plásticos com capacidade de 920 ml, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As amostras foram coletadas durante 60 s, com intervalos de 3 min entre as coletas, sendo os potes com solo e água pesados e, logo após, adicionados 5 ml de sulfato de alumínio e potássio [KAl (SO₄)₂.12H₂O] a 5% para acelerar o processo de sedimentação. Os potes permaneceram em repouso por 24 horas e com auxílio de uma mangueira plástica, foi retirado por sifonamento o máximo possível de água sobrenadante. Posteriormente, os potes foram colocados em estufa a uma temperatura média de 50 a 60 °C até peso constante. Em seguida, os potes foram pesados com e sem o solo seco. A massa de água foi calculada, subtraindo-se a massa de solo perdida da massa total da enxurrada. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em suspensão (kg l⁻¹).

Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos

As perdas totais de solo em entressulcos foram obtidas pela Equação 2:

$$PSi = \frac{\sum Q C t}{A} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: PSi é a perda de solo em entressulcos (kg m⁻²); Q é a descarga total (kg s⁻¹); C é a concentração de sedimentos na enxurrada (kg l⁻¹); t é o intervalo de tempo entre duas amostragens (s); A é a área da parcela (m²).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos foram determinadas conforme a Equação 3:

$$D_i = \frac{M_{ss}}{A \, d \, c} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: D_i é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); M_{ss} é a massa do solo seco desagregado (kg); A é a área da parcela (m^2); dc é a duração da coleta (s).

A erodibilidade nos entressulcos foi calculada pela Equação 4 (Elliot et al., 1989):

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: K_i é erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i é a taxa máxima de desagregação do solo nos entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), obtida através da média das quatro taxas mais consistentes de desagregação entre as últimas cinco observadas; I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), e S_f , o fator de correção para o declive.

Esse fator é dado pela Equação 5 (Liebenow et al., 1990):

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{(-4 \sin(\theta))} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: θ é o ângulo do declive (graus) e \exp é a base dos logaritmos neperianos. Este fator S_f é de 0,2 para declive plano e 1 para declive de 45° .

Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos

A descarga líquida (q_i), em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, foi determinada a partir das coletas de enxurrada em potes plásticos com capacidade de 920 ml, colocados na extremidade da calha de descarga, durante o tempo cronometrado, dividido pela largura da parcela.

A velocidade superficial do escoamento (V_s) foi determinada por meio da cronometragem do tempo gasto para que um corante, azul de metileno, percorresse a distância entre dois pontos fixos na parcela. Essas determinações foram realizadas a intervalos de cinco minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento. As velocidades médias do escoamento (V_m) foram determinadas pelo produto das velocidades superficiais do escoamento e um fator de correção $\alpha = 2/3$, tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade (Katz et al., 1995).

Com base na determinação da descarga líquida (q_i) e da velocidade média do escoamento (V_m) foram estimadas outras características hidráulicas.

A altura da lâmina do escoamento foi estimada através da equação derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para fluxo em um plano sob chuva de duração finita, dada pela Equação 6:

$$h = \frac{q_i}{V_m} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: h é a altura da lâmina de escoamento (m); q_i é a descarga líquida total por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O número de Reynolds foi obtido por meio da Equação 7 de Simons & Senturk (1992), dada por:

$$Re = \frac{V_m h}{\nu} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que: Re é o número de Reynolds, adimensional; V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); h é a altura da lâmina de escoamento (m) e ν é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática do escoamento varia em função da temperatura. O valor foi obtido com a utilização da Equação 8 de Julien (1995), que é expressa conforme a temperatura da água, dada por:

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \cdot 10^{-6} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: T é a temperatura da água em $^{\circ}\text{C}$.

O número de Froude foi obtido por meio da Equação 9, apresentada por Simons & Senturk (1992), expressa por:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g h}} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que: Fr é o número de Froude, adimensional; V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); e h é a altura da lâmina de escoamento (m).

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (Chow, 1959) e dada pela Equação 10:

$$f = \frac{8 g h S}{V_m^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: f é o fator de perda de carga, adimensional; g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); h é a altura da lâmina do escoamento (m); S é a inclinação do declive (m m^{-1}); e V_m é a velocidade do escoamento (m s^{-1}).

A rugosidade superficial foi determinada pelo coeficiente de Manning (n) o qual, conforme Braida & Cassol (1999), pode ser expresso pela Equação 11:

$$n = \frac{h^{2/3} S^{1/2}}{q_i} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que: n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($s \, m^{-1/3}$); h é a altura da lâmina de escoamento (m); q_i é a descarga líquida ($m^2 \, s^{-1}$); S é o declive da parcela ($m \, m^{-1}$).

A tensão cisalhante do escoamento em entressulcos foi obtida por meio da Equação 12, dada por Chow (1959):

$$\tau = \gamma \, h \, S \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento do escoamento (Pa); γ é o peso específico da água ($N \, m^{-3}$); h é a altura da lâmina de escoamento (m); e S é a declividade da parcela ($m \, m^{-1}$).

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as comparações múltiplas de médias foram realizadas pelo uso do Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os dados foram submetidos à análise multivariada por componentes principais (ACP), com o objetivo de verificar quais características físicas e químicas poderiam ser utilizados para diferenciar ou para indicar similaridades entre as classes de solo quanto a sua erodibilidade. Foram utilizadas ainda, correlações simples e análises de regressão linear múltipla, com base no teste “t”. As análises foram realizadas por meio do uso do programa software R version 3.5.1 “Feather Spray” (R Core Team, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O regime de escoamento em todos os solos foi caracterizado como laminar lento ou subcrítico, de acordo com os valores do número de Reynolds (Re) < 500 e do número de Froude (Fr) < 1 (Tabela 3). Valores de descarga líquida (q_i) na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e altura de lâmina (h) de 10^{-4} m , juntamente com o regime de escoamento, caracterizado por baixos valores do número de Reynolds, indicam ocorrência de escoamento característico da erosão em entressulcos, semelhante ao observado por Cassol et al. (2004) e Cantalice et al. (2009).

Tabela 3. Características hidráulicas do escoamento superficial em entressulcos para os diferentes solos estudados

Solos (1)	v	V_m	q_i	h	n	Re	Fr	f	τ
	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1} \times 10^{-7}$	m s^{-1}	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1} \times 10^{-5}$	$\text{m} \times 10^{-4}$	$\text{s m}^{-1/3}$	— Adimensional —			— Pa —
LA	8,74b	0,03742b	2,18a	5,83a	0,05911a	25,00a	0,49b	3,28a	0,58a
PV	8,73b	0,03873b	1,90ab	5,03ab	0,05321ab	21,81c	0,56b	2,90ab	0,50ab
RL	8,84ab	0,05071a	2,20a	4,30b	0,03570b	24,85ab	0,78a	1,32b	0,43b
TC	9,07a	0,03691b	2,10a	5,70a	0,05889a	23,17bc	0,49b	3,28a	0,57a

Fonte: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013). Legendas: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; v = viscosidade cinemática; V_m = velocidade média; q_i = descarga líquida unitária do escoamento; h = altura da lâmina de escoamento; n = coeficiente de rugosidade de Manning; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = fator de perda de carga; τ = tensão cisalhante do escoamento; Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

É possível observar na Tabela 3 a diferença significativa na hidráulica do escoamento para a velocidade média (V_m) e para altura (h), sendo essas diferenças condicionadas pela rugosidade superficial (n) quantificada por meio da perda de carga (f). De forma geral, o RL apresentou um escoamento superficial com maior velocidade (V_m) e menor altura de lâmina de água (h) em relação ao LA e ao TC, já o PV apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente dos demais solos. O fator de perda de carga e o coeficiente de rugosidade de Manning representam o fator de resistência que a superfície do solo oferece ao deslocamento do escoamento (Merten et al., 2001). Sendo assim, é possível constatar que a resistência ao escoamento foi menor no RL, seguido pelo PV, por apresentarem um menor n e um menor f . Esses resultados corroboram com o observado por Ding & Huang (2017), que estudando os efeitos da rugosidade superficial do solo nos processos de erosão em entressulcos e distribuição de tamanho de partículas de sedimentos, concluíram que, comparado com a condição da superfície

regular, as superfícies irregulares do solo atrasaram o início do escoamento armazenando água nas depressões do microrrelevo.

Observando os valores para a descarga líquida unitária (q_i), constata-se que os solos avaliados apresentaram comportamento semelhante (Tabela 3), e ainda, aproximando-se com o a intensidade média da chuva simulada de $2,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ observada por Nunes & Cassol (2008) avaliando Latossolos, e de $2,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ observada por Oliveira (2010) em áreas com Argissolos, Neossolos e Cambissolos, ambos no Rio Grande do Sul. Este comportamento indica uma baixa taxa de infiltração ou ausência da mesma, possivelmente devido a formação de selamento na camada superficial dos solos e/ou a supressão proposital da drenagem pela saturação da parcela experimental 24h antes do início das chuvas simuladas e a tensão de água equivalente a 15 cca aplicada à parcela ao início dos testes, semelhante ao observado por Nunes & Cassol (2008), determinando a estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul.

Observa-se que a taxa de desagregação para o RL foi a maior nos primeiros instantes da chuva simulada (Figura 3) em relação aos outros solos, comportamento que pode ser explicado pelo alto teor de areia, principalmente na sua fração muito fina (AMF), em que os valores observados são praticamente o dobro do encontrado para o LA e o TC. Apresenta menores valores para o diâmetro médio ponderado dos agregados ($DMPA_U$ e $DMPA_S$) e consequentemente baixo índice de estabilidade dos agregados em água (IEA_T e IEA_C), menor teor de carbono orgânico (CO) e de óxidos de Fe_d e Al_o , bem como a menor rugosidade superficial (n) dentre os solos avaliados, favorecendo o maior escoamento superficial nos instantes iniciais (Tabelas 2 e 3).

O PV apresenta comportamento semelhante ao RL após 18 minutos de chuva (Figura 3), e mesmo apresentando teores mais elevados de argila, CO e de óxidos de Fe_d e Al_o , esse comportamento pode ser atribuído aos baixos valores de $DMPA_U$ e IEA_C , não diferindo estatisticamente do RL, ao mais baixo valor para IEA_T diferindo estatisticamente dos demais solos, ao baixo teor de Fe_o , ao maior teor de argila dispersa em água e ao segundo maior teor de AMF (Tabela 2), dentre os solos avaliados.

A estabilidade de agregados influencia muitos aspectos do comportamento das características físicas do solo, particularmente a erosão hídrica, sendo inversamente proporcional à taxa de desagregação e a erodibilidade do solo em entressulcos (An & Liu, 2017, Vaezi et al., 2018); além disso, a fração areia muito fina (AMF) em maiores quantidades no RL e no PV, respectivamente, apresenta partículas mais facilmente erodíveis, juntamente com as frações de silte e areia fina (Bonilla & Johnson, 2012), que vão sendo transportadas e sedimentadas ao longo do evento de chuva simulada,

preenchendo o espaço poroso do solo quando depositadas, criando um selo superficial que afeta negativamente o destacamento de partículas pela ação do impacto das gotas de chuva, diminuindo a taxa de desagregação do solo, que tende a diminuir também com a disponibilidade decrescente de partículas prontamente destacáveis e disponíveis.

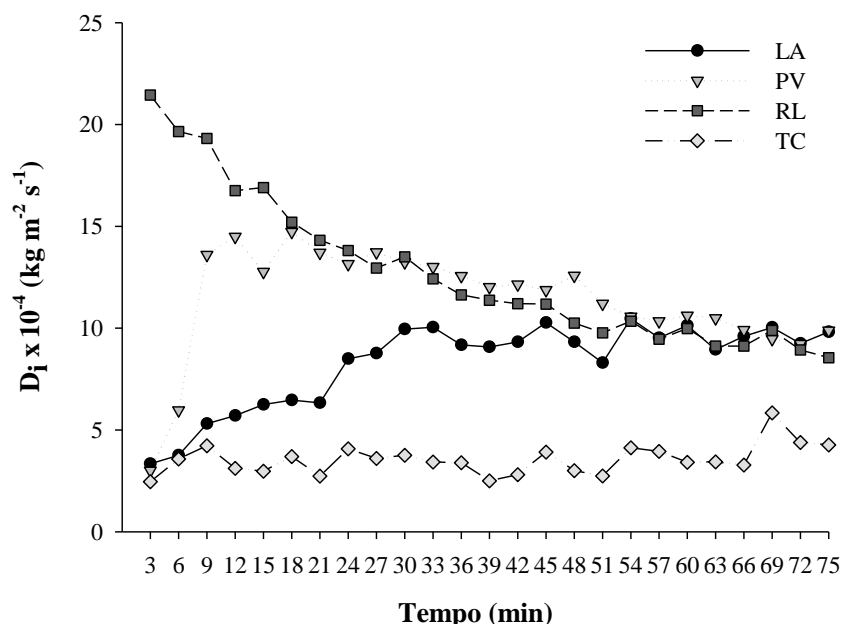


Figura 3. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) ao longo do tempo de ensaio com chuva simulada, para os testes realizados em condições de laboratório, de solos do estado da Paraíba (LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvissolo Crômico).

O LA demonstrou uma maior resistência inicial a desagregação em comparação ao RL e ao PV, porém, por volta dos 45 minutos de chuva simulada, apresentou comportamento similar aos solos citados (Figura 3), quando observa-se que após os instantes iniciais da chuva, possivelmente devido a quebra dos agregados ao longo do tempo, a disponibilidade de partículas e de agregados de frações menores aumenta, ocorrendo ajustamento entre as taxas de destacamento de solo e a capacidade de transporte de sedimentos a partir dos 55 minutos, aproximadamente.

Na caracterização física e química (Tabela 2), é possível observar que o LA apresenta os maiores teores de óxidos de Fe_d , Al_o e Al_d , o segundo menor teor de carbono orgânico, a menor CTC, o menor teor de óxido de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o), o segundo maior valor para argila dispersa em água, não diferindo estatisticamente do valor mais alto apresentado pelo PV para esta variável, valores intermediários para $DMPA_U$ (o segundo maior, diferindo estatisticamente dos demais solos), e para $DMPA_S$ (segundo maior, não diferindo estatisticamente do TC), apresenta ainda o segundo maior valor para

IEA_T (63,4%), diferindo estatisticamente dos demais solos, e o segundo maior IEA_C (62,1%), não diferindo estatisticamente para o valor obtido para o TC (64,1%).

O LA apresentou o segundo maior teor de argila dentre os solos avaliados (Tabela 2), com a predominância mineralógica da caulinita (Tabela 1), e segundo Ferreira et al. (1999) e Pedrotti et al. (2003), em estudos com Latossolos, os óxidos de alumínio, provenientes basicamente da decomposição da caulinita e da gibbsita, exercem maior influência nos atributos físico-químicos e estruturais desses solos do que os óxidos de ferro. Ferreira et al. (1999), estudando a influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil, verificaram que a maior estabilidade dos agregados desses Latossolos foi devida aos óxidos de alumínio.

O comportamento do LA (Figura 3), mesmo apresentando índices de estabilidade de agregados acima de 60% (Tabela 2), pode ser devido ao fato de os óxidos de alumínio menos cristalinos (Al_o) associarem-se aos atributos físicos relacionados com a agregação das partículas do solo, podendo esta associação ser atribuída à afinidade deste elemento com a matéria orgânica (Pedrotti et al., 2003), confirmada neste trabalho pela correlação do Al_o com o CO ($r = 0,88$, $p < 0,01$) e com o IEA_C ($r = 0,73$, $p < 0,05$) apresentadas na Tabela 5, sendo a ação dos óxidos na agregação dependente não somente dos seus teores e tipos, mas também dos teores e da qualidade do carbono orgânico existente no solo (Ferreira et al., 2007).

Ferreira et al. (2007) sugeriram que o carbono orgânico e as formas de ferro do solo expressam sua capacidade estabilizante em níveis diferentes de energia de desagregação (carbono orgânico até 30 minutos, Fe_o aos 60 minutos e Fe_d aos 90 minutos). Essas afirmações corroboram com o observado na Figura 3 e na Tabela 2 (teores de CO) para o comportamento do LA submetido a chuva simulada quando, aproximadamente aos 30 minutos de chuva, nível crítico da capacidade estabilizante do CO nos agregados proposto pelos autores, já atinge praticamente a taxa máxima de desagregação.

Assim, como os óxidos de alumínio, que atuam como agentes cimentantes mais expressivos nos Latossolos, dependem da matéria orgânica, em sua maioria, por estarem nela complexados (Pedrotti et al., 2003), ao diminuir a capacidade cimentante e estabilizante do CO nos agregados ao longo do tempo, após os 30 minutos de chuva simulada, a quebra dos agregados ocorre mais facilmente, disponibilizando agregados menores e partículas mais finas de menor densidade, facilmente carregáveis pela seletividade do fluxo laminar característico da erosão em entressulcos (Bertol et al., 2007), elevando a taxa de desagregação (Figura 3).

O comportamento constante da taxa de desagregação em entressulcos, observado na Figura 3, para o TC desde os primeiros minutos de chuva simulada, pode ser função do alto teor de carbono orgânico e óxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade (Fe_o e Al_o) denominadas as formas mais ativas desses óxidos (Teixeira et al., 2017), assim como da alta estabilidade de agregados em água (IEA_T e IEA_C) desse solo e os maiores valores para os diâmetros médios ponderados dos agregados (Tabela 2) em relação aos demais solos avaliados, mesmo não havendo diferença estatística em relação ao LA para $DMPA_S$. Os agregados de menor tamanho, ou os agregados finos (assim como as partículas de menor diâmetro) tendem a ser mais suscetíveis a erosão hídrica em termos de escoamento e erodibilidade entre os solos; já os agregados de maior diâmetro apresentaram maior resistência à quebra contra o impacto das gotas de chuva e, em consequência, favorecem um menor escoamento, bem como menor destacamento de partículas do que os agregados finos (Vaezi et al., 2018).

O Luvissolo Crômico (TC) apresentou menores valores para erodibilidade em entressulcos (K_i) e taxa máxima de desagregação (D_i), diferindo estatisticamente dos demais solos avaliados (Tabela 4). Para perda total de solo (PS_i), o TC não apresentou diferença estatística significativa com o LA, e ambos apresentaram diferença estatística significativa com os demais solos para esta variável. Contudo, o LA, o PV e o RL não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si na comparação das médias para as variáveis D_i e K_i (Tabela 4).

Tabela 4. Perdas totais de solo (PS_i), taxa máxima de desagregação do solo (D_i) e erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) obtidos em condições de laboratório, sob chuva de 85 mm h^{-1} ($i = 2,36 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) e declividade de $0,10 \text{ m m}^{-1}$

Solos ⁽¹⁾	PS_i	D_i	K_i
	$\text{Kg m}^{-2} \times 10^{-2}$	$\text{Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^{-4}$	$\text{Kg s m}^{-4} \times 10^6$
LA	8,84 b	9,47 a	3,54a
PV	19,14 a	9,77 a	3,69a
RL	20,85 a	9,26 a	3,41a
TC	1,77 b	4,23 b	1,60b

⁽¹⁾ Embrapa (2013): LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvissolo Crômico; PS_i = perdas totais de solo em entressulcos; D_i = taxa de desagregação do solo em entressulcos; K_i = erodibilidade em entressulcos. Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Albuquerque et al. (2000) e Nunes & Cassol (2011), a erodibilidade em entressulcos varia conforme as características de cada solo, e os solos com maior estabilidade de agregados em água tendem a ser os menos suscetíveis à erosão hídrica do

solo. A distribuição do tamanho de agregados e sua estabilidade podem ser índices apropriados para estimar a erodibilidade em entressulco (Albuquerque et al., 2000; Ding & Zang, 2016; Vaezi et al., 2018).

Contudo, os índices de estabilidade de agregados (IEA_T e IEA_C) não foram suficientes para descrever o comportamento do LA mediante a erosão hídrica (Figura 3). A perda total de solos (PS_i), por ser um somatório das perdas pontuais durante o evento de chuva simulada (Equação 2), ainda reflete parte da resistência inicial desse solo a erosão causada pela chuva.

O fato do LA ter sido agrupado juntamente com o RL e o PV quanto a sua taxa máxima de desagregação (D_i) e a sua erodibilidade do solos em entressulco (K_i), além das diferenças nas composições físicas e químicas desse solo, se deve as condições estabelecidas para o cálculo da média para o D_i , utilizado na formula do K_i (Equação 4), obtida através da média das quatro taxas mais consistentes de desagregação entre as últimas cinco observadas (Elliot et al., 1989), corroborando com o observado na Figura 3, em que é possível observar o agrupamento das taxas de desagregação para o RL, o PV e o LA a partir de decorridos 60 minutos até o fim da duração do evento de chuva simulada.

Os resultados apresentados na Tabela 4 diferem dos apresentados por Albuquerque et al. (2000), que avaliando a relação entre a erodibilidade em entressulcos e a estabilidade de agregados em sete solos (três Latossolos, Nitossolo, Vertissolo, Chernossolo e Planossolo) concluíram que, os solos mais desenvolvidos foram os mais estáveis e apresentaram menor erodibilidade do solo em entressulcos em relação aos solos menos desenvolvidos.

A partir da análise de correlação entre as variáveis estudadas (Tabela 5), é possível verificar quais características dos solos apresentaram relação significativa com a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), sendo elas: Areia total ($p < 0,05$), areia muito grossa ($p < 0,01$), areia grossa ($p < 0,01$), areia fina ($p < 0,01$), óxido de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o) ($p < 0,01$), diâmetro médio ponderado de agregados peneirados via úmida ($DMPA_U$) ($p < 0,01$) e o índice de estabilidade de agregados (IEA_T) ($p < 0,01$) proposto por Teixeira et al. (2017).

É possível observar ainda na Tabela 5, as correlações da perda total de solo (PS_i) e da taxa máxima de desagregação do solo (D_i) com o K_i , sendo diretamente proporcionais, assim como o teor de areia fina. O restante das variáveis analisadas que apresentaram correlação com o K_i demonstraram relação inversamente proporcional.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre o teor de óxido de alumínio de baixa cristalinidade (Al_o), diâmetros médios ponderados dos agregados obtidos por via úmida ($DMPA_U$), por via seca ($DMPA_S$), índices de estabilidade de agregados (IEA_T e IEA_C) Perdas totais de solo (PS_i), Taxa máxima de desagregação do solo (D_i) e erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) com os componentes da caracterização física e química dos solos avaliados

	Al_o	$DMPA_S$	$DMPA_U$	IEA_T	IEA_C	PS_i	D_i	K_i
Areia Total	-0,54	-0,74**	0,24	0,49	-0,02	-0,26	-0,56	-0,59*
AMG	0,35	0,03	0,86**	0,84**	0,60*	-0,72**	-0,94**	-0,93**
AG	0,00	-0,38	0,71**	0,84**	0,47	-0,62*	-0,85**	-0,86**
AM	-0,63*	-0,95**	-0,02	0,32	-0,03	-0,11	-0,08	-0,11
AF	-0,62*	-0,14	-0,96**	-0,92**	-0,87**	0,81**	0,78**	0,76**
AMF	-0,77**	-0,20	-0,82**	-0,77**	-0,96**	0,72**	0,39	0,37
Silte	0,23	-0,03	0,00	0,02	0,33	0,00	0,46	0,47
Argila	0,53	0,85**	-0,27	-0,55	-0,09	0,29	0,47	0,50
ARG H₂O	0,58*	0,79**	-0,22	-0,47	0,02	0,16	0,45	0,48
GF	0,40	0,64*	-0,18	-0,40	-0,07	0,22	0,38	0,41
D_s	-0,88**	-0,66*	-0,36	-0,15	-0,58	0,38	-0,07	-0,10
D_p	0,53	0,54	0,46	0,25	0,42	-0,08	-0,28	-0,28
P_T	0,88**	0,74**	0,50	0,24	0,61	-0,28	-0,11	-0,09
pH H₂O	-0,44	-0,84**	0,36	0,65*	0,22	-0,37	-0,47	-0,50
CO	0,88**	0,89**	0,49	0,19	0,47	-0,36	-0,35	-0,31
Fe_o	-0,41	-0,51	0,36	0,52	0,02	-0,26	-0,71*	-0,72**
Fe_d	0,85**	0,76**	0,18	-0,06	0,45	-0,16	0,25	0,28
Al_o	-	0,76**	0,62*	0,37	0,73*	-0,52	-0,25	-0,22
Al_d	-	0,68*	-0,05	-0,27	0,26	0,04	0,47	0,50
DMPA_S	-	-	0,16	-0,20	0,20	-0,02	0,00	0,04
DMPA_U	-	-	-	0,93**	0,88**	-0,77**	-0,79**	-0,77**
IEA_T	-	-	-	-	0,83**	-0,79**	-0,77**	-0,76**
IEA_C	-	-	-	-	-	-0,69**	-0,50	-0,48
PSi	-	-	-	-	-	-	0,73**	0,72**
D_i	-	-	-	-	-	-	-	0,99**
K_i	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: Areia Total (2-0,053 mm); AMG = Areia muito grossa (2-1 mm); AG = Areia grossa (1-0,5 mm); AM = Areia média (0,5-0,25 mm); AF = Areia fina (0,25-0,106 mm); AMF = Areia muito fina (0,106-0,053 mm); Silte (0,053-0,002 mm); Argila (<0,002 mm); ARG H₂O = Argila dispersa em água; GF = Grau de flocculação; D_s = Densidade do solo; D_p = Densidade de partículas; P_T = Porosidade Total; pH H₂O = pH em água;); C.O. = Carbono Orgânico; Fe_o e Al_o = Óxidos de ferro e alumínio extraídos com oxalato de amônio ácido; Fe_d e Al_d = Óxidos de ferro e alumínio extraído com ditionito-citrato-bicarbonato; IEA_T = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Teixeira et al. (2017); IEA_C = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Cesário et al. (2010). Coeficientes de correlação (R) seguidos por * e por ** possuem significância de p < 0,05 e p < 0,01 pela correlação de Pearson, respectivamente.

É preciso ressaltar na Tabela 5, as correlações existentes entre as frações de areia muito grossa (AMG) e areia grossa (AG) com os índices de estabilidade de agregados IEA_T e IEA_C, e a correlação entre a AMG e AG com o diâmetro médio ponderado de agregados peneirado via úmida (DMPA_U), indicando possivelmente que essas partículas de

areia, estando ou não na estrutura dos agregados, cumprem a função de elevar a resistência do solo a erosão hídrica, possivelmente pela atuação na rugosidade superficial do solo, se comportando como agregados estáveis e ainda oferecendo resistência aos processos de desagregação, transporte e sedimentação na superfície do solo.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foi possível elaborar gráficos e equações que demonstram as relações entre as variáveis que apresentaram correlações altamente significativas ($p < 0,01$) com o K_i (Figura 4).

A Figura 4A apresenta a correlação inversamente proporcional entre o IEA_T e o K_i , já observada por diversos autores, e confirmada ao longo do tempo (Meyer & Harmon, 1984; Albuquerque et al., 2000; Nunes & Cassol, 2008; Gumiere et al., 2009; Algayer et al., 2014; Ding & Zang, 2016; An & Liu, 2017; Vaezi et al., 2018), em que é possível observar que quanto maior o IEA_T , menor será o K_i . Os mesmos autores afirmam que o índice de estabilidade de agregados, na maioria dos casos, é um parâmetro que pode ser utilizado para determinar, de forma indireta, a erodibilidade dos solos em entressulcos.

Na Figura 4B é possível observar a correlação inversamente proporcional entre o diâmetro médio ponderado dos agregados peneirados via úmida ($DMPA_U$) e a erodibilidade em entressulcos (K_i), corroborando com o observado por Vaezi et al. (2018), avaliando a relação entre a erodibilidade em entressulcos e a classe tamanho dos agregados em um solo semi-árido sob chuva simulada, relataram que os agregados de menor tamanho, ou as partículas menores, tendem a ser mais suscetíveis à erosão hídrica em termos de escoamento e erodibilidade, e que os agregados de maior diâmetro apresentaram maior resistência à quebra contra o impacto das gotas de chuva e, em consequência, favorecem um menor escoamento, bem como menor destacamento de partículas do que os agregados menores. Albuquerque et al. (2000), Ding & Zang (2016) e Vaezi et al. (2018), afirmam que a distribuição do tamanho de agregados e sua estabilidade podem ser índices apropriados para estimar a erodibilidade em entressulco.

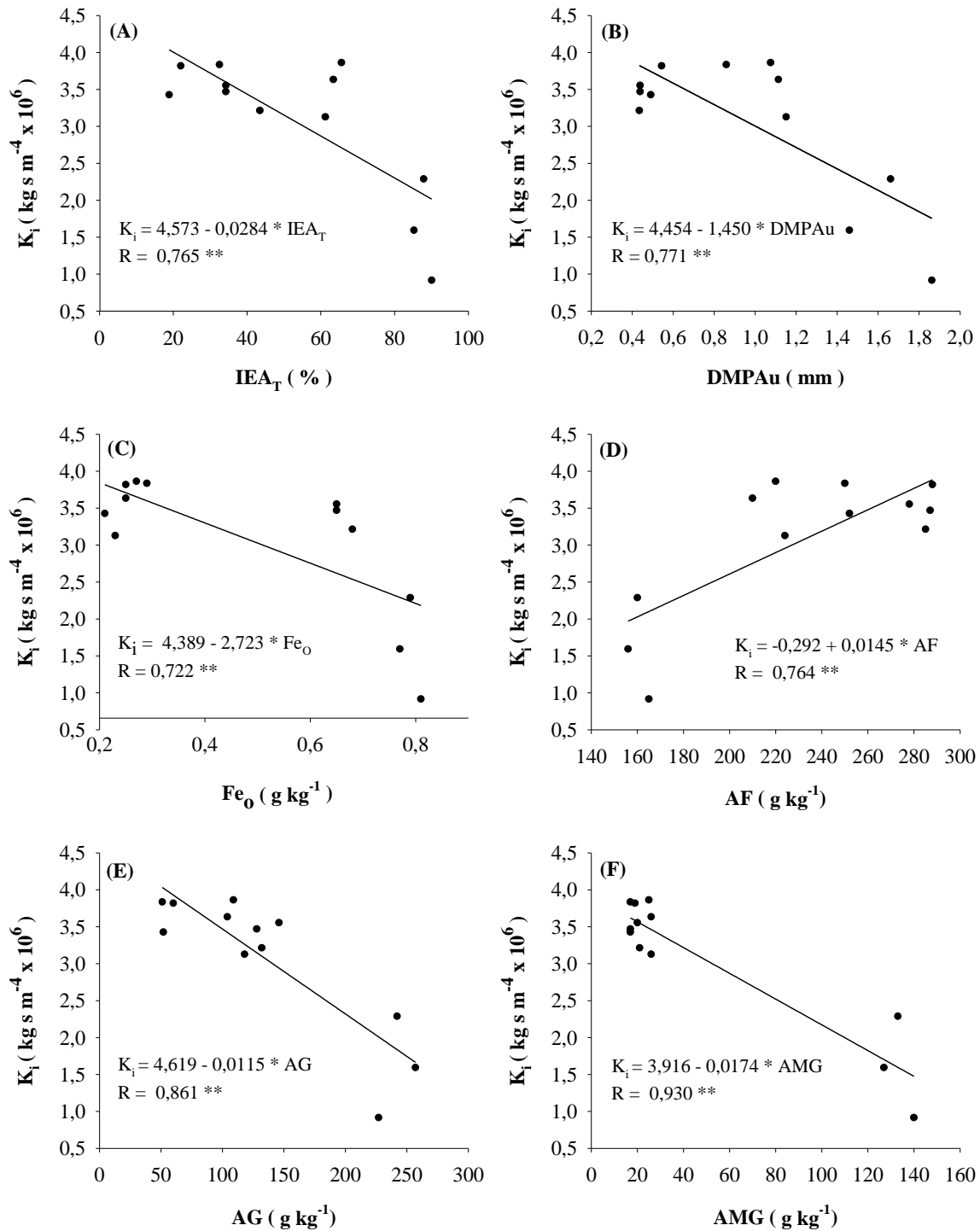


Figura 4. Correlações entre a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) com as propriedades do solo: (A) Índice de estabilidade de agregados segundo Teixeira et al. (2017); (B) Diâmetro médio ponderado de agregados peneirados via úmida; (C) Óxido de ferro extraído com oxalato de amônio ácido; (D) Fração da areia fina (0,25-0,106 mm); (E) Fração de areia grossa (1-0,5 mm); (F) Fração de areia muito grossa (2-1 mm)

A correlação entre os óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraídos com oxalato de amônio ácido (Fe_o) e o K_i observada na Figura 4C, representa a funcionalidade dos óxidos de ferro como agentes cimentantes e estabilizantes nos agregados, observada por diversos autores. Düiker et al. (2003), afirmaram que o óxido de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o), apesar de estar presente em menores concentrações do que o Fe_d na maioria dos solos, contribui mais para o aumento da estabilidade dos agregados, pois tem área superficial muito maior e mais reativa do que os óxidos de Fe cristalinos. Nunes & Cassol (2011), estudando a produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul, concluíram que quanto maior o teor de óxidos de ferro, maior a estabilidade dos agregados e menor a erodibilidade do solo em entressulcos. Veiga et al. (1993) também obtiveram correlação significativa entre os óxidos de Fe_o e o fator K_i , promovendo uma cimentação das partículas primárias do solo, originando agregados com alta estabilidade, os quais contribuem para a menor erodibilidade em entressulcos.

A Figura 4D ilustra a correlação diretamente proporcional entre os teores de areia na fração fina (AF, 0,25-0,106 mm) e o K_i , em que notadamente, com o aumento dos teores de AF na composição textural do solo, o K_i se eleva, devido a areia fina ser material praticamente inerte, prontamente disponível quando não faz parte dos agregados dos solos e de fácil transporte pela seletividade do fluxo laminar no processo de erosão em entressulcos.

As frações de areia muito grossa (AMG, 2-1 mm) e areia grossa (AG, 1-0,5 mm) apresentaram correlação inversamente proporcional com a erodibilidade do solo em entressulcos (Figura 4E e 4F), possivelmente alterando a rugosidade superficial do solo, atuando contra o fluxo de água na superfície, e devido ao tamanho e a densidade dessas partículas, oferecendo resistência ao processo de destacamento, transporte e sedimentação envolvidos na erosão do solo em entressulcos. Quanto maior o diâmetro e a massa das partículas de areia, mais energia cinética da gota de chuva será necessária para causar o destacamento e transporte dessas partículas, principalmente para transporte lateral causado pelo efeito “splash” (Choo et al., 2018). Panagos et al. (2014) relataram que, como as partículas grosseiras atuam como proteção contra a erosão do solo, eles devem ser levados em consideração para uma melhor estimativa da erodibilidade do solo.

Após análise de regressão entre as propriedades dos solos avaliados no presente estudo que apresentaram correlação altamente significativa ($p < 0,01$) com o K_i , foi obtido um modelo (Stepwise) com um coeficiente de determinação da erodibilidade em entressulcos $R^2 = 0,821^{**}$ ($p < 0,001$). Esse modelo pode ser expresso pela Equação 13:

$$K_i = [5,060 - 1,104 (DMPA_U) - 1,924 (Fe_o)] \times 10^6 \quad \text{Eq. (13)}$$

Sendo: K_i o fator de erodibilidade do solo em entressulco (kg s m^{-4}); $DMPA_U$ o diâmetro médio ponderado de agregados peneirados via úmida (mm); e Fe_o o teor de óxido de ferro extraído com oxalato de amônio ácido (g kg^{-1}).

Para determinar se as equações existentes na literatura se adequam aos solos avaliados nesse estudo, o K_i foi determinado de forma indireta pela equação propostas por Alberts et al. (1995), utilizada no modelo WEPP, e pela equação proposta por Nunes & Cassol (2008), desenvolvida para estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul, para fim de comparação com o valor observado para o K_i determinado pela aplicação de chuva simulada (Tabela 6).

Tabela 6. Valores do fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) obtido experimentalmente em laboratório e estimados por equações matemáticas obtidas por análise de regressão, para os solos avaliados

Modelo	Equação Utilizada	Fator Erodibilidade K_i ($\text{kg s m}^{-4} \times 10^6$)			
		Solos ⁽¹⁾			
		LA	PV	RL	TC
Chuva Simulada (K_i Observado) ⁽²⁾	$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f}$	3,54	3,69	3,41	1,60
Nascimento (2019) ⁽³⁾	$K_i = [5,060 - 1,104 (DMPA_U) - 1,924 (Fe_o)] \times 10^6$	3,35	3,88	3,30	1,71
Modelo WEPP ⁽⁴⁾	$K_{ib} = 2728000 + 19210000 \times AMF$	3,67	4,36	4,69	3,82
Modelo de Nunes & Cassol (2008) ⁽⁵⁾	$K_{iN} = [1,982 - 8,886 \cdot 10^{-4} (Arg) - 0,228 (Fe_o)] \times 10^6$	1,76	1,63	1,76	1,71

Fontes: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); ⁽²⁾ Fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme proposto por Elliot et al. (1989); ⁽³⁾ Fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme proposto neste estudo; ⁽⁴⁾ Fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme proposto pelo modelo WEPP (Alberts et al., 1995) para solos com mais de 30% de areia na composição textural; ⁽⁵⁾ Fator erodibilidade do solo em entressulcos conforme proposto por Nunes & Cassol (2008). Legendas: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; K_i = Erodibilidade do solo em entressulco; $DMPA_U$ = Diâmetro médio ponderado de agregados peneirados via úmida; Fe_o = Óxido de ferro extraído com oxalato de amônio ácido; AMF = Areia muito fina; Arg = Argila.

É possível observar na Tabela 6 que o modelo proposto por Alberts et al. (1995) para o modelo WEPP, aplicado a solos com mais de 30% de areia na composição textural, aproximou o valor do K_i estimado para o observado no LA, porém, para os demais solos, apresentou valores para o K_i acima dos valores observado em chuva simulada, superestimando a erodibilidade dos solos em entressucos.

O modelo proposto por Nunes & Cassol (2008) subestimou os valores de K_i para os solos LA, PV e RL em praticamente 50% em relação ao valor obtido com a aplicação de chuvas simuladas. Para o TC, o modelo apresentou valores próximos ao observado (Tabela 6).

Essas diferenças nos valores do K_i obtidos através da aplicação dos modelos e do K_i obtido experimentalmente evidenciam a possibilidade de erros causados pelo uso de metodologias desenvolvidas para outras regiões, devido a existência de muitas classes de solos e, dentro de cada classe, diferenças no valor do fator K , atribuídas aos fatores de formação, material de origem do solo, a predominância climática no local e as condições de uso e manejo da terra (Martins et al., 2011; Cassol et al., 2018).

CONCLUSÕES

1. O regime de escoamento laminar lento, juntamente com os valores de descarga líquida na ordem de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e os valores da altura de lâmina do escoamento na ordem de 10^{-4} m , em todos solos avaliados, confirmaram a ocorrência da erosão em entressulcos;
2. As variáveis: areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia fina (AF), óxido de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o), diâmetro médio ponderado de agregados (DMPA_U), índice de estabilidade de agregados (IEA_T), perdas totais de solos (PSi) e a taxa máxima de desagregação (D_i) apresentaram correlações altamente significantes ($p < 0,01$) com o fator de erodibilidade dos solos em entressulcos (K_i) para os solos avaliados;
3. Dos solos avaliados, o Luvissole Crômico (TC), mesmo sendo menos desenvolvido pedogeneticamente, apresentou-se o mais estável, com menores valores de PSi , D_i e K_i ;
4. As frações de areia muito grossa (AMG) e areia grossa (AG) apresentaram correlação altamente significativa ($p < 0,01$) com o diâmetro médio ponderado de agregados (DMPA_U), com o índice de estabilidade de agregados (IEA_T), com a taxa máxima de desagregação (D_i) e com o fator de erodibilidade dos solos em entressulcos (K_i), indicando que essas frações da areia não devem ser desconsideradas para cálculos do índice de estabilidade de agregados e que influenciam de forma relevante a erodibilidade dos solos em entressulcos;
5. Os valores para o fator de erodibilidade dos solos em entressulcos (K_i), estimados a partir dos modelos propostos por Alberts et al. (1995) e Nunes & Cassol (2008), superestimaram e subestimaram, respectivamente, os valores para o K_i obtidos através da aplicação de chuva simulada em praticamente todos os solos;
6. O modelo obtido e expresso na Equação 13 é constituído por apenas duas propriedades, de determinação fácil e rápida em laboratório, sendo elas, o diâmetro médio ponderado de agregados (DMPA_U), e o óxido de ferro de baixa cristalinidade, obtido por extração com oxalato de amônio ácido (Fe_o). Assim, pode ser usado como uma ferramenta para estimar o fator K_i (erodibilidade do solo em entressulcos) de solos com características semelhantes aos avaliados nesse estudo.

REFERÊNCIAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Climatologia**. <https://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/climatologia/>. Acesso em: 08 de fev. 2019.

ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, J. M.; LAFLIN, J. M.; SIMANTON, J. R. Soil component. *In*: FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **Water Erosion Prediction Project - WEPP**. West Lafayette, USDA, p. 1-47, 1995. (Technical Documentation, 10).

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 24, n. 1, p. 141-151, 2000.

ALBUQUERQUE, J. A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ALGAYER, B.; WANG, B.; BOURENNANE, H.; ZHENG, F.; DUVAL, O.; LI, G.; LE BISSONNAIS, Y.; DARBOUX, F. Aggregate stability of a crusted soil: differences between crust and sub-crust material, and consequences for interrill erodibility assessment. An example from the Loess Plateau of China. **Eur. J. Soil Sci.**, v. 65, n. 3, p. 325-335, 2014.

AN, J.; LIU, Q. Soil aggregate breakdown in response to wetting rate during the inter-rill and rill stages of erosion in a contour ridge system. **Catena**, v. 157, p. 241-249, 2017.

AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W.; ELHAUS, D. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena**, v. 118, p. 220-225, 2014.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V. V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 29, p. 21-31, 2005.

BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrients losses by water erosion. **Science Agricultural**, v. 60, p. 581-586, 2003.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 103-110, 2007.

BONILLA, C. A.; JOHNSON, O. I. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. **Geoderma**, v. 189-190, p. 116–123, 2012.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 23, p. 711-721, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisa e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **I. Levantamento exploratório de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

BREVIK, E. C.; CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; PEREG, L.; QUINTON, J. N.; SIX, J.; VAN OOST, K. The interdisciplinary nature of soil. **Soil**, v. 1, p. 117-129, 2015.

CAMMERAAAT, E.; CERDÀ, A.; IMESON, A. C. Ecohydrological adaptation of soils following land abandonment in a semiarid environment. **Ecohydrology**, v. 3, p. 421-430, 2010.

CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; OLIVEIRA, O. F. L.; MELO, R. O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividades e doses de cobertura morta. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 68-74, 2009.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 685-690, 2004.

CASSOL, E. A.; SILVA, T. S.; ELTZ, F. L. F.; LEVIEN, R. Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the Universal Soil Loss Equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. **Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]**, v. 42, e0170262, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20170262>.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BALIEIRO, F. C. **Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 57).

CHENG, M.; XIANG, Y.; XUE, Z.; AN, S.; DARBOUX, F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 124, p. 77-84, 2015.

CHOO, H.; PARK, K. H.; WON, J.; BURNS, S. E. Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 1-10, 2018.

CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill. 1959. 690 p.

DIAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J. H. Disruptive methods for assessing soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 3-22, 2002.

DING, W.; HUANG, C. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. **Geomorphology**, v. 295, p. 801-810, 2017.

DING, W.; ZHANG, X. An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility. **Journal of Mountain Science**, v. 13, n. 5, p. 831-843, 2016.

DÜIKER, S. W.; FLANAGAN, D. C.; LAL, R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of Southwest Spain. **Catena**, v. 45, p. 103-121, 2001.

DÜIKER, S. W.; RHOTON, F. E.; TORRENT, J.; SMECK, N. E.; LAL, R. Iron (hydr) oxide cristallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 606-611, 2003.

ELLIOT, W. J.; LIEBNOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88**. West Lafayette, The Ohio State University and USDA-ARS, 1989. (Report, 3).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2013. 353 p.

FAO; ITPS - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS AND INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS. **Status of the world's soil resources (SWSR)**: Main Report. Rome, FAO and ITPS, 2015. 650 p.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I. Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 23, p. 515-524, 1999.

FERREIRA, F. P.; AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; GIRELLI, D. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciênc. Rural**, v. 37, n. 2, p. 381-388, 2007.

FORSYTHE, W. M. **Física de suelos**: manual de laboratório. San José: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas, 1975. 212 p.

FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; NEIBLING, W. H. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 28, p. 133-139, 1985.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; SANTOS, D.; MATOS, R. M. Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Rev. Bras. de Geografia Física**, v. 8, p.1006-1016, 2015.

FRANCO, Â. M. P.; CASSOL, E. A.; PAULETTO, E. A.; INDA, A. V. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. de Agrociência**, v. 18, p. 175-187, 2012.

FREITAS, T. S. **Atributos físicos de solos representativos do estado da paraíba**. 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

FRISTENSKY, A. J.; GRISMER, M. E. Evaluation of ultrasonic aggregate stability and rainfall erosion resistance of disturbed and amended soils in the Lake Tahoe Basin, USA. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 93-102, 2009.

GUMIERE, S. J.; LE BISSONNAIS, Y.; RACLOT, D. Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization and sensitivity. **Catena**, v. 77, n. 3, p. 274-284, 2009.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 73-89.

JAYAWARDENA, A. W.; BHUIYAN, R. R. Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data. **Hydrol. Processes**, v. 13, p. 89-100, 1999.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Melbourne: Cambridge Univ. Press, 1995. 280 p.

KATZ, D. M.; WATTS, F. J.; BURROUGHS, E. R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal Hydrology Division**, v. 121, p. 546-553, 1995.

KESSTRA, S.; PEREIRA, P.; NOVARA, A.; BREVIK, E. C.; AZORIN-MOLINA, C.; PARRAS-ALCÁNTARA, L.; JORDÁN, A.; CERDÀ, A. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. **Sci. Total Environ.**, v. 551-552, p. 357-366, 2016.

KOITER, A. J.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; LOBB, D. A. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes. **Catena**, v.153, p. 194-206, 2017.

LADO, M.; BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, v. 24, n. 3-4, p. 209-224, 2004.

LIEBENOW, A. M.; ELLIOT, W. J.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. O. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 33, p. 1882-1888, 1990.

LIGONJA, P. J.; SHRESTHA, R. P. Soil erosion assessment in Kondoa eroded area in Tanzania using universal soil loss equation, geographic information systems and socioeconomic approach. **Land Degrad. Dev.**, v. 26, p. 367-379, 2015.

LIMA, P. M. P.; ANDRADE, H.. Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com B Textural e B Latossólico do sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 25, n. 2, p. 463-474, 2001 .

MARTINS, S. G.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FONSECA, S. Erodibilidade do solo nos Tabuleiros Costeiros. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 41, p. 322-327, 2011.

MERTEN, G. H.; NEARING, M. A.; BORGES, A. L. O. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 861-868, 2001.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple intensity rainfall Simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 22, p. 100-103, 1979.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 1152- 1157, 1984.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; ROMKENS, M. J. M. Source of soil eroded by water from upland slopes. *In: PRESENT AND PROSPECTIVE TECNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELDS AND SOURCES*, 1, 1972, Oxoford, **Proceedings**, Oxford, USA, Research Service, 1975. p. 177-189.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, n. 6, p. 2175-2182, 2011.

MONTANARELLA, L. *et al.* World's soils are under threat. **Soil**, v. 2, p. 79-82, 2016.

MONTEIRO, A. L. **Caracterização mineralógica de solos representativos do Estado da Paraíba**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Programa de Pós Graduação Manejo de Solo e Água, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

NASCIMENTO, R. J. A. **Erodibilidade em entressulcos, escoamento superficial e formação de crosta em solos representativos do estado da Paraíba**. 2019. 115f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, p. 2839-2845, 2008.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 541-547, 2011.

OLIVEIRA, F. P. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em Arvorezinha, RS, utilizando o WEPP**. 2010. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, F. H. T.; LEAL, J. V.; SANTOS, D.; FARIAS, D. R.; ARRUDA, J. A. Banco de solos representativos do Estado da Paraíba. *In*: REUNIÃO BRESILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA AGUA (RBMCSA), 16., 2006, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: SBCS, 2006. Resumos. CD-ROM.

PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; ALEWELL, C. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. **Science of The Total Environment**, v. 479-480, p. 189–200, 2014.

PARYSOW, P.; WANG, G.; GERTNER, G.; ANDERSON, A. Spatial uncertainly analysis for mapping soil erodibility on joint sequential simulation. **Catena**, v. 53, p. 65-78, 2003.

PEQUENO, P. L. L. **Funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água em solos da mesorregião do Agreste paraibano**. 2016. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

PROSDOCIMI, M.; JORDÁN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÀ, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Science of The Total Environment**, v. 547, p. 323-330, 2016.

PULIDO MONCADA, M.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W.; LOBO, D. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators. **Land Degrad. Dev.**, v. 26, n. 8, p. 843-852, 2015.

R CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. Version 3.5.1. “Feather Spray”. Vienna, Austria. **R Foundation For Statistical Computing**, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

SANCHIS, M. P. S.; TORRI, D.; BORSELLI, L.; POESEN, J. Climate effects on soil erodibility. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, n. 7, p. 1082-1097, 2008.

SANTOS, F. A.; AQUINO, C. S. Panorama da desertificação no Nordeste do Brasil: características e suscetibilidades. **InterEspaço**. v. 2, n. 7, p. 144-161, 2017.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SALCEDO, I. H.; SOUZA, A. P.; SILVA, V. D. M. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, p. 1301-1310, 2011.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico sob chuva natural. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 6, p. 1906-1917, 2014.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch photochemische Extraktion mit saurer Ammonium-Oxalat-Lösung. Z. Pflanzenernähr. **Bodenkunde**. v. 105, p. 194-202, 1964.

SILVA, A. M.; SCHULZ H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2 ed. São Carlos: Rima, 2007. 158 p.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. **Sediment transport technology**: water and sediment dynamics. Littleton: Water Resources Publication, 1992. 897p.

SINGH, V. P. Analytical solutions of cinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advanced Water Research**, v. 6, p. 88-95, 1983.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TISDALL, J. M.; COCKROFT, B.; UREN, N. C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. **Aust. J. Soil Res.**, v. 16, p. 9-17, 1978.

VAEZI, A. R.; ESLAMI, S. F.; KEESSTRA, S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. **Catena**, v. 167, p. 385-398, 2018.

VAEZI, A. R.; BAHRAMI, H. A. Relationship between soil productivity and erodibility in rainfed wheat lands in northwestern Iran. **J. Agric. Sci. Technol**, v. 16, p. 1455-1466, 2014.

VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V.; REICHERT, J. M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 17, p. 289-298, 1993.

VEIHE, A. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from Northern Ghana. **Geoderma**, v. 106, p. 101-120, 2002.

VIEIRA, M. S.; OLIVEIRA, F. H. T. S.; HEMMANNUELLA C.; MEDEIROS, J. S. Contribution of non-exchangeable potassium forms and its accumulation in corn plants. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 9-15, 2016.

WANG, G.; FANG, Q.; TENG, Y.; YU, J. Determination of the factors governing soil erodibility using hyperspectral visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 53, p. 48-63, 2016.

WANG, G.; WU, B.; ZHANG, L.; JIANG, H.; XU, Z. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 514, p. 180-191, 2014.

WOOLHISER, D. A.; LIGGETT, J. A. Unsteady onedimensional flow over a plane - The rising hydrograph. **Water Resources Research**, v. 3, p. 753-771, 1967.

ZHANG, X. C.; NEARING, M. A.; GARBRECHT, J. D. Gaining insights into interrill erosion processes using rare earth element tracers. **Geoderma**, v. 299, p. 63-72, 2017.

ZHANG, X. C.; WANG, Z. L. Interrill soil erosion processes on steep slopes. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 652-664, 2017.

ZHOU, J.; FU, B.; GAO, G.; LÜ, Y.; LIU, Y.; LÜ, N.; WANG, S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 137, p. 1-11, 2016.

CAPÍTULO II

Selamento superficial e formação de crosta em solos representativos da Paraíba

RESUMO

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. **Selamento superficial e formação de crosta em solos representativos do estado da paraíba**. Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Fevereiro de 2019. Cap. II. 29 p.il. Tese. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

A formação de selo e crosta superficial no solo tem consequências diretas para o desenvolvimento das culturas e qualidade ambiental, alterando a estrutura do solo, diminuindo a disponibilidade de água para as plantas e aumentando o escoamento superficial e a erosão. Diante disto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, por metodologia indireta, as alterações causadas por sucessivos eventos de precipitação na superfície do solo, nas variáveis hidráulicas do escoamento e nos processos envolvidos na erodibilidade do solo em entressulcos, para entender os efeitos causados pelo selamento superficial e formação de crosta. Foram avaliadas quatro classes de solos: Latossolo Amarelo (LA); Argissolo Vermelho (PV); Neossolo Litólico (RL); Luvisolo Crômico (TC). O critério de seleção teve como base o grau de desenvolvimento pedogenético. Em laboratório conduziram-se os experimentos de erosão em entressulcos sob chuva simulada, com solo descoberto e declividade da parcela de $0,10 \text{ mm}^{-1}$. Os testes foram realizados em parcelas experimentais, com área útil de $0,3481 \text{ m}^2$, onde efetuou-se ensaios com chuvas simuladas, com intensidade média ajustada em 85 mm h^{-1} durante 75 minutos. As chuvas simuladas foram aplicadas em três eventos consecutivos com intervalos de 7 dias (Períodos 0, 7 e 14 dias), para determinar os efeitos da formação do selamento superficial durante a chuva e a formação de crosta após o período de secagem do solo na parcela. Foram avaliadas as variáveis hidráulicas do escoamento, a perda de solo (PSi), taxa média de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e o fator de erodibilidade em entressulcos (K_i). O regime de escoamento em todos os solos foi caracterizado como laminar lento ou subcrítico e a ocorrência de erosão em entressulcos foi confirmada. A formação de selamento e de crostas superficiais foram observadas com aumento da velocidade de escoamento e da descarga líquida, e a diminuição da altura da lamina de água, assim como nas alterações em PSi , D_i e K_i , sendo no primeiro evento de chuva simulada a maior contribuição para formação do encrostamento superficial. O TC se mostrou o mais estável após os eventos sucessivos de chuva simulada, mesmo tendo a rugosidade superficial modificada, não apresentou alterações significativas na concentração de sedimento em suspensão, perdas totais de solo, taxa máxima de desagregação e erodibilidade do solo em entressulco.

Palavras Chave: Erosão entressulco, semiárido, concentração de sedimentos, rugosidade superficial, variáveis hidráulicas do escoamento.

ABSTRACT

RODOLPHO JOSÉ DE ALMEIDA NASCIMENTO. **Surface sealing and crust formation in paraíba state representative soils.** Areia - PB, Agricultural Science Center, UFPB, February 2019. Cap. II. 29f. il. Thesis. Postgraduate Program of Soil Science. Advisor: Dr. Flávio Pereira de Oliveira.

The formation of seal and surface crust in the soil has direct consequences for the development of the crops and environmental quality, altering the soil structure, reducing the availability of water to the plants and increasing the runoff and erosion. The objective of this study was to evaluate, by indirect method, the changes caused by successive rainfall events on the soil surface, the hydraulic flow variables and the processes involved in the soil interrill erodibility, to understand the effects caused by surface sealing and crust formation. Four soils were evaluated: Ferralsol (FR); Acrisol (AC); Leptosol (LP); Luvisol (LV). The selection criterion was based on the degree of pedogenetic development. The interrill erosion experiments were conducted under simulated rainfall and laboratory conditions, with uncovered soil and plot slope of 0.10 mm^{-1} . The tests were carried out in experimental plots, with a useful area of $0,3481 \text{ m}^2$, where it was carried out tests with simulated rains, with mean intensity adjusted to 85 mm h^{-1} for 75 min. Simulated rains were applied at three consecutive events at 7 day intervals (Periods 0, 7 and 14 days) to determine the effects of surface sealing during rainfall and crust formation after the soil drying period on plot. The hydraulic flow variables, the total soil losses (PSi), the maximum soil disaggregation rate in interrill (D_i) and the interrill erodibility factor (K_i) were evaluated. The flow regime in all soils was characterized as slow or subcritical laminar and the occurrence of interrill erosion was confirmed. The formation of sealing and surface crusts were observed with increase of the flow velocity and liquid discharge, and the decrease of the height of the water sheet, as well as in the changes in PSi, D_i and K_i , being in the first event of simulated rainfall the greater contribution to formation of superficial crusting. The Luvisol (LV) showed the most stable after the successive events of simulated rainfall, even though the surface roughness was modified, did not present significant changes in the concentration of suspended sediment, total soil losses, maximum disaggregation rate and soil interrill erodibility.

Keywords: Interill erosion, semiarid, sediment concentration, surface roughness, hydraulic flow variables.

INTRODUÇÃO

A ação direta do impacto das gotas de chuva na superfície do solo descoberto ocasiona uma série de efeitos: desintegração de agregados, destacamento, transporte e deposição de partículas, causando erosão e modificando a estrutura superficial do solo de várias formas. Uma das alterações que ocorre é a formação de encrostamento superficial, característica comum de solos cultivados em várias regiões do mundo (Kinnel, 2005; Hu et al., 2012; Dalla Rosa et al., 2013). A formação de crostas superficiais no solo tem consequências diretas para o desenvolvimento das culturas e para a qualidade ambiental, pois dificulta a infiltração de água no solo e a disponibilidade de água para as raízes das plantas, previne a emergência de plântulas devido à compactação da camada superficial do solo, aumenta o escoamento superficial e a erosão (Assouline, 2004), reduz a produção agrícola e provoca impactos ambientais (Touma et al., 2011).

O impacto da chuva na superfície do solo é um dos principais fatores para a formação do selamento superficial. A energia cinética associada ao impacto das gotas de chuva destrói os agregados do solo e ao mesmo tempo ocorrem processos de dispersão físico-química e posterior reorganização de partículas. A porosidade na superfície do solo é significativamente reduzida devido ao preenchimento e entupimento dos poros pelo material fino transportado pela enxurrada, a compactação associada aos impactos de gotas de chuva e a deposição de partículas de argila na superfície do solo após chuva (Assouline, 2004). Esse processo dá origem a formação de um selo estrutural. A desidratação do selo superficial causado pela chuva resulta na formação de uma crosta estrutural, ou seja, o selamento superficial ocorre na fase úmida ou durante a precipitação, e a crosta superficial se forma a partir da secagem do solo, tornando o selo superficial em crosta superficial (Armenise et al., 2018).

Durante o processo de formação do selo superficial, as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 a 50 mm, modificando as propriedades físicas do solo, principalmente a condutividade hidráulica, devido a redução no número e na continuidade do espaço poroso, afetando a infiltração e a distribuição de água ao longo do perfil do solo, além de alterar a rugosidade superficial do solo ao mesmo tempo que aumenta o escoamento superficial e a erosão por salpicamento (Carmi & Berliner, 2008; Hu et al., 2012; Zonta et al., 2012; Armenise et al., 2018).

Segundo Williams et al. (2018), os três principais tipos morfológicos de crostas físicas do solo, que podem ocorrer individualmente ou em combinação, desenvolvem-se através de processos naturais e antropogênicos, sendo eles: (I) as crostas estruturais, formadas através da modificação *in situ* da superfície do solo pelo impacto da gota de chuva e por ciclos de umedecimento e secagem; (II) Os horizontes superficiais vesiculares, formados quando o ar é aprisionado pelo avanço das frentes úmidas, criando poros vesiculares; e (III) as crostas sedimentares, formadas através da deposição de material transportado pela enxurrada.

As alterações das condições superficiais dependem das características do solo como textura, mineralogia, matéria orgânica, umidade inicial, distribuição, tamanho e estabilidade dos agregados, entre outros (Fox & Le Bissonnais, 1998; Le Bissonnais & Singer, 1993), bem como dos fatores climáticos, especialmente da chuva (intensidade, distribuição de tamanho de gota, energia cinética), além da cobertura vegetal, atividade biológica e uso da terra (Le Bissonnais et al., 2005)

Segundo Dalla Rosa et al. (2013) e Brandão (2006), o estudo e o detalhamento do processo de formação de crostas do solo podem ser monitorados diretamente, utilizando técnicas de microscopia para análises micromorfológicas, ou indiretamente, pela observação da alteração nas características físicas e hídricas do solo inerentes a condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo. Diversos estudos abordando selamento superficial e encrostamento do solo têm sido realizados, desde o início do século XX, e o interesse em ambos os fenômenos, não surpreendentemente, continua, em razão das suas importantes consequências, no meio ambiente, além de ocorrência do fenômeno em culturas com importância econômica (Souza et al., 2014).

Devido às particularidades de cada classe de solo, e às variações existentes dentro de cada classe por diferenças edafoclimáticas nos ambientes de formação, e ainda, pela importância sócioeconômica que cada uma das classes avaliadas representa para as diferentes regiões, faz-se necessário estudo sobre a erosão hídrica e suas consequências para as particularidades locais visando obtenção do conhecimento sobre os processos envolvidos na formação do selo e da crosta superficial para escolha das melhores estratégias para preservação ambiental e da capacidade produtiva sustentável do solo.

Para testar a hipótese de que solos com distintos estágios de desenvolvimento pedogenético respondem de maneira diferente ao selamento superficial e a posterior formação de crosta superficial, o presente trabalho teve como objetivo avaliar por metodologia indireta: I) as alterações causadas pela erosão hídrica na superfície do solo representada pelo coeficiente de rugosidade de Manning; II) as mudanças nas

características das variáveis hidráulicas como a velocidade média, a altura da lâmina e a descarga líquida unitária do escoamento; e III) o fator de erodibilidade em entressulco de quatro solos representativos do estado da Paraíba, em três períodos de aplicação de chuva simulada.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Rural, localizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba. Foram utilizadas amostras de quatro solos que fazem parte do Banco de Solos Representativos do Estado da Paraíba (Oliveira et al., 2006), selecionados de acordo com as diferentes classes, sua representatividade e grau de desenvolvimento pedogenético (Tabela 7), sendo eles: LATOSSOLO AMARELO Distófico petroplântico (LA), ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto (PV), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RL) e LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vertissólico (TC). As amostras foram coletadas em campo, na camada superficial de 0-20 cm de profundidade, em locais georreferenciados, em condições de conservação mais próximas ao natural, ou sem cultivo agrícola.

Caracterização física, química e mineralógica dos solos

A caracterização física e química dos solos avaliados (Tabela 8) foi realizada seguindo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Além do índice de estabilidade de agregados proposto na metodologia citada (IEA_T), obtido através da relação entre os diâmetros médios ponderados dos agregados obtidos por via úmida e seca ($DMPA_U/DMPA_S$), o índice de estabilidade de agregados também foi determinado através da equação proposta por Cesário et al. (2010), desenvolvida a partir da análise crítica das equações propostas por Castro Filho (1998) e Hillel (2003).

Tomando como padrão o limite superior da areia fina (0,2 mm), Cesário et al. (2010) propuseram descontar somente as areias que ficaram retidas na peneira de 0,25 mm e nas peneiras menores, que assim são considerados “falsos agregados”, e não, como propôs Hillel (2003), descontar a areia de todas as classes, havendo um entendimento por parte dos autores de que as partículas de areia, que após o peneiramento não se desprenderam e permaneceram “aderidas” à massa de agregados, não devem ser

descontadas, estando sob alguma circunstância unida ao agregado, fazendo parte de sua funcionalidade, sugerindo nesse sentido o seguinte calculo (Equação 1):

$$EA = \frac{PAS - (P25 - \text{Areia})}{PAS - \text{Areia}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: EA é a estabilidade de agregados (%); PAS é o peso da amostra seca (g); P25 é o peso da massa de agregados menores que 0,25 mm (g); Areia é o peso da areia retida nas classes menores 0,25 mm (g).

Tabela 7. Classes de solo, localização de coleta, vegetação predominante, relevo, média de precipitação anual, formação geológica e litologia, mineralogia e índice de intemperismo dos solos avaliados

Variáveis	Solos ⁽¹⁾			
	Mais desenvolvidos ⁽⁶⁾		Menos desenvolvidos ⁽⁶⁾	
	LA	PV	RL	TC
Perfil ⁽²⁾	4	23	53	30
U.M. ⁽²⁾	LVe1	TRe1	SS2	NC4
Microrregião Geográfica / Cidade ⁽²⁾	Curimataú Ocidental / Cuité	Guarabira / Alagoa Grande	Curimataú Ocidental / Pocinhos	Sapé / São Miguel de Taipú
Vegetação ⁽²⁾	Floresta Subcaducifólia	Floresta Subcaducifólia	Caatinga Hiperxerófila	Floresta Caducifólia
Relevo ⁽²⁾	Plano	Ondulado	Plano a suavemente ondulado	Ondulado
Precipitação e Concentração das chuvas ⁽⁴⁾	872,7 mm Março a Maio	950,0 mm Março a Agosto	382,3 mm Março a Julho	1029,3 mm Março a Julho
Classificação de Köppen ⁽⁵⁾	As	BSh	BSh	As
Formação geológica e litologia ⁽²⁾	Terciário / Sedimentos da Série Serra do Martins	Pré-Cambiano (CD) / Hornblenda-biotita-gnaiss.	Pré-Cambiano / Gnaiss.	Pré-Cambiano (CD) / Hornblenda-gnaiss.
Minerais ⁽³⁾	Ct, Gt	Ct, Gt, Mi, Hm	Mi, Ct, (2:1)	Ct, Mi, (2:1), Fp
Ki (SiO₂/Al₂O₃) ⁽²⁾	2,16	2,25	2,93	3,42

Fontes: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); ⁽²⁾ Brasil (1972); ⁽³⁾ Dados apresentados por Farias et al. (2009) na ordem de sua predominância na fração argila do solo; ⁽⁴⁾ Dados obtidos pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - AESA (2019); ⁽⁵⁾ Classificação realizada por Francisco et al. (2015). Legenda: U.M.= Unidade de Mapeamento; Ki (SiO₂/Al₂O₃) = Índice de intemperismo; LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvissolo Crômico; Ct = caulinita; Gt = goethita; Mi = mica; Hm = hematita; (2:1) = argilomineral tipo 2:1; Fp = feldspatos; ⁽⁶⁾ Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46; Solos menos desenvolvidos: Ki > 2,46.

Tabela 8. Características físicas e químicas dos solos avaliados

Variáveis	Solos ⁽¹⁾			
	Mais desenvolvidos ⁽⁵⁾		Menos desenvolvidos ⁽⁵⁾	
	LA	PV	RL	TC
Físicas ⁽²⁾				
Areia Total (g kg ⁻¹)	627 b	548 b	795 a	798 a
Areia muito grossa (g kg ⁻¹)	27 b	18 b	19 b	133 a
Areia grossa (g kg ⁻¹)	110 b	54 c	135 b	242 a
Areia média (g kg ⁻¹)	223 ab	128 c	256 a	206 b
Areia fina (g kg ⁻¹)	218 b	263 a	283 a	160 c
Areia muito fina (g kg ⁻¹)	49 c	85 b	102 a	57 c
Silte (g kg ⁻¹)	188 a	124 b	120 b	102 b
Argila (g kg ⁻¹)	185 b	328 a	85 c	100 c
Argila Dispersa H ₂ O (g kg ⁻¹)	34,6 ab	45,1 a	20,4 c	23,7 bc
Grau de Floculação (%)	81 a	86 a	76 a	76 a
Densidade do Solo (kg dm ⁻³)	1,42 c	1,46 bc	1,62 a	1,51 b
Densidade de Partículas (kg dm ⁻³)	2,52 a	2,58 a	2,44 a	2,63 a
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,44 a	0,43 a	0,34 b	0,43 a
DMPA _U	1,11 b	0,63 c	0,44 c	1,66 a
DMPA _S	1,76 b	2,57 a	1,19 c	1,89 b
IEA _T (%)	63,4 b	24,5 d	37,3 c	87,7 a
IEA _C (%)	62,1 a	33,9 b	20,4 b	64,1 a
Químicas ⁽³⁾				
pH (H ₂ O)	5,90	5,00	6,20	6,20
C.O. (g kg ⁻¹)	5,90	8,00	3,80	7,60
P (mg dm ⁻³)	11,42	2,32	4,31	4,35
K (cmol _c dm ⁻³)	0,18	0,19	0,19	0,64
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,60	1,90	2,00	6,10
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,15	0,80	1,10	4,00
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,11	0,04	0,25	0,10
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,32	0,05	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,14	4,28	2,29	2,90
CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	5,18	7,20	5,83	13,74
Saturação por Bases (V %)	59,00	41,00	61,00	79,00
Saturação por Alumínio (m %)	0,00	10,00	1,00	0,00
Fe _o (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,25	0,25	0,66	0,79
Fe _d (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	7,63	7,63	2,13	4,69
Al _o (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,33	0,33	0,16	0,33
Al _d (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	1,12	1,12	0,21	0,38

Fontes: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); ⁽²⁾ Obtido a partir das bases de dados apresentadas por Pequeno (2016) para LA, PV e RL, e por Freitas (2016) para TC; ⁽³⁾ Dados apresentados por Farias et al. (2009); ⁽⁴⁾ Dados apresentados por Santos et al. (2011). Legenda: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; Areia Total (2-0,053 mm); AMG = Areia muito grossa (2-1 mm); AG = Areia grossa (1-0,5 mm); AM = Areia média (0,5-0,25 mm); AF = Areia fina (0,25-0,106 mm); AMF = Areia muito fina (0,106-0,053 mm); Silte (0,053-0,002 mm); Argila (< 0,002 mm); DMPA_U = Diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via peneiragem úmida; DMPA_S = Diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via peneiragem seca; IEA_T = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Teixeira et al. (2017); IEA_C = Índice de estabilidade de agregados segundo metodologia proposta por Cesário et al. (2010); C.O. = Carbono Orgânico; Fe_o e Al_o = Óxidos de ferro e alumínio extraídos com oxalato de amônio ácido; Fe_d e Al_d = Óxidos de ferro e alumínio extraído com ditionito-citrato-bicarbonato. ⁽⁵⁾ Solos mais desenvolvidos: Ki ≤ 2,46; Solos menos desenvolvidos: Ki > 2,46. Médias seguidas de mesmas letras, em linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Chuvas simuladas

A erosão hídrica dos solos em entressulcos foi determinada em laboratório, sob chuva simulada, em solo descoberto. Os materiais dos solos coletados foram destorroados e passados em peneiras com abertura de malha de 10 mm, posteriormente secos ao ar.

As parcelas experimentais foram construídas com material em acrílico e montadas sobre uma estrutura metálica, com área útil de 0,3481 m², com dimensões de 0,59 m por 0,59 m e altura de 0,10 m, com bordadura lateral de 0,20 m de largura. O volume da parcela experimental foi preenchido com uma camada de 3 cm de espessura de brita, sobre a qual foi colocada uma camada de 1 cm de areia com diâmetro 0,25mm, uma tela de plástico com malha de 1 mm e uma camada de solo com 6 cm de espessura, para uma densidade de empacotamento (Dep) de 1,2 g cm⁻³.

As amostras de solo nas parcelas foram saturadas com antecedência de 24 horas, mediante um conjunto de seis mangueiras acopladas ao fundo da parcela, conectadas a um reservatório de água posicionado a uma altura levemente superior ao topo da parcela experimental. Ao iniciar os testes com chuva, aplicou-se uma tensão de água equivalente a 60 cm de coluna d'água (60 cca), a qual foi mantida durante a aplicação do ensaio. A declividade das parcelas experimentais foi de 0,10 m m⁻¹. As chuvas simuladas foram efetuadas utilizando-se simulador de chuvas, semelhante ao descrito por Meyer & Harmon (1979), com um bico aspersor tipo Veejet 80-100 com diâmetro interno de 12,7 mm situado a 3,1 m acima da superfície da parcela, operando com uma pressão constante de 41 kPa na saída de água do bico. Em todos os ensaios, foram aplicadas chuvas simuladas com três repetições para cada solo, com intensidade média ajustada em 85 mm h⁻¹ durante 75 minutos.

As intensidades médias das chuvas foram determinadas através de um conjunto de pluviômetros, colocados ao acaso ao lado da área útil das parcelas experimentais. As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram obtidas pela pesagem do material coletado em potes plásticos com capacidade de 920 ml, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As amostras foram coletadas durante 60 s, com intervalos de 3 min entre as coletas, os potes com solo e água foram pesados e, logo após, adicionados 5 ml de sulfato de alumínio e potássio [KAl (SO₄)₂.12H₂O] a 5% para acelerar o processo de sedimentação. Os potes permaneceram em repouso por 24 horas e com auxílio de uma mangueira plástica, foi retirado por sifonamento o máximo possível de água sobrenadante. Posteriormente, os potes foram colocados em estufa a uma temperatura média de 50 a 60 °C até peso constante. Em seguida os potes foram pesados com e sem o solo seco. A massa

de água foi calculada, subtraindo-se a massa de solo perdida da massa total da enxurrada. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em suspensão (kg l^{-1}).

Cálculo da taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos

As perdas totais de solo em entressulcos foram obtidas pela Equação 2:

$$PSi = \frac{\sum QCt}{A} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: PSi é a perda de solo em entressulcos (kg m^{-2}); Q é a descarga total (kg s^{-1}); C é a concentração de sedimentos na enxurrada (kg l^{-1}); t é o intervalo de tempo entre duas amostragens (s); A é a área da parcela (m^2).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos foram determinadas conforme a Equação 3:

$$D_i = \frac{Mss}{A \, d \, c} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: D_i é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Mss é a massa do solo seco desagregado (kg); A é a área da parcela (m^2); dc é a duração da coleta (s).

A erodibilidade nos entressulcos foi calculada pela Equação 4 (Elliot et al., 1989):

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: K_i é erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i é a taxa máxima de desagregação do solo nos entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), obtida através da média das quatro taxas mais consistentes de desagregação entre as últimas cinco observadas; I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), e S_f , o fator de correção para o declive.

Esse fator é dado pela Equação 5 (Liebenow et al., 1990):

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{(-4\text{sen}(\theta))} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: θ é o ângulo do declive (graus) e e é a base dos logaritmos neperianos. Este fator S_f é 0,2 para declive plano e 1 para declive de 45° .

Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos

A descarga líquida (q_i), em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, foi determinada a partir das coletas de enxurrada em potes plásticos com capacidade de 920 ml, colocados na extremidade da calha de descarga, durante o tempo cronometrado, e dividido pela largura da parcela.

A velocidade superficial do escoamento (V_s) foi determinada por meio da cronometragem do tempo gasto para que um corante, azul de metileno, percorresse a distância entre dois pontos fixos na parcela. Essas determinações foram realizadas em intervalos de cinco minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento. As velocidades médias do escoamento (V_m) foram determinadas pelo produto das velocidades superficiais do escoamento e um fator de correção $\alpha = 2/3$, tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade (Katz et al., 1995).

Com base na determinação da descarga líquida (q_i) e da velocidade média do escoamento (V_m) foram estimadas outras características hidráulicas.

A altura da lâmina do escoamento foi estimada através da equação derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para fluxo em um plano sob chuva de duração finita e dada pela Equação 6:

$$h = \frac{q_i}{V_m} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: h é a altura da lâmina de escoamento (m); q_i é a descarga líquida total por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O número de Reynolds foi obtido por meio da Equação 7 de Simons & Senturk (1992), dada por:

$$\text{Re} = \frac{V_m h}{\nu} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que: Re é o número de Reynolds, adimensional; V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); h é a altura da lâmina de escoamento (m) e ν é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática do escoamento varia em função da temperatura. O valor foi obtido com a utilização da Equação 8 de Julien (1995), que é expressa conforme a temperatura da água, dada por:

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \cdot 10^{-6} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: T é a temperatura da água em $^{\circ}\text{C}$.

O número de Froude foi obtido por meio da Equação 9, apresentada por Simons & Senturk (1992), expressa por:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g h}} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que: Fr é o número de Froude, adimensional; V_m é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); e h é a altura da lâmina de escoamento (m).

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (Chow, 1959), e dada pela Equação 10:

$$f = \frac{8 g h S}{V_m^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: f é o fator de perda de carga, adimensional; g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); h é a altura da lâmina do escoamento (m); S é a inclinação do declive (m m^{-1}); e V_m é a velocidade do escoamento (m s^{-1}).

A rugosidade superficial foi determinada pelo coeficiente de Manning (n) o qual, conforme Braida & Cassol (1999), pode ser expresso pela Equação 11:

$$n = \frac{h^{2/3} S^{1/2}}{q_i} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que: n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($\text{s m}^{-1/3}$); h é a altura da lâmina de escoamento (m); q_i é a descarga líquida ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); S é o declive da parcela (m m^{-1}).

A tensão cisalhante do escoamento em entressulcos foi obtida por meio da Equação 12, dada por Chow (1959):

$$\tau = \gamma h S \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento do escoamento (Pa); γ é o peso específico da água (N m^{-3}); h é a altura da lâmina de escoamento (m); e S é a declividade da parcela (m m^{-1}).

Selamento superficial e formação de crosta

Para a avaliação indireta dos efeitos causados pela formação de crosta e selamento superficial, foram repetidos os ensaios com chuvas simuladas em três repetições para cada solo, sendo determinada a taxa de desagregação e da erodibilidade do solo em entressulcos bem como a caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos,

seguindo a metodologia anteriormente citada, onde a superfície do solo não foi preparada e permaneceu exposta para secar ao ar durante em intervalos de 7 e 14 dias após a chuva inicial para formação de crosta após sua secagem, posteriormente comparadas com as determinações obtidas com a aplicação da chuva no tempo 0.

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as comparações múltiplas de médias foram realizadas pelo uso do Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foram utilizadas ainda, correlações simples e análises de regressão, com base no teste “t”. As análises foram realizadas por meio do uso do programa software R version 3.5.1 “Feather Spray” (R Core Team, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 9 são apresentados os dados referentes às características hidráulicas do escoamento nos três períodos (0, 7 e 14 dias) em que foram aplicadas as chuvas simuladas onde é possível inferir, de forma indireta, os efeitos da formação de crosta superficial através das diferenças no comportamento das variáveis hidráulicas após cada teste.

O regime de escoamento em todos os solos foi caracterizado como laminar lento ou subcrítico, de acordo com os valores do número de Reynolds (Re) < 500 e do número de Froude (Fr) < 1 (Tabela 9), assim como os valores de descarga líquida (q_i) na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e altura de lâmina (h) 10^{-4} m , juntamente com o regime de escoamento, caracterizado por baixos valores do número de Reynolds, indicando ocorrência de escoamento característico da erosão em entressulcos, semelhante ao observado por Cassol et al. (2004) e Cantalice et al. (2009).

Verifica-se que, para a viscosidade cinemática (ν), não houve diferença estatística entre os diferentes períodos de aplicação das chuvas a que os solos foram submetidos (Tabela 9). Isso pode ser justificado devido a esta variável depender apenas da temperatura da água, e que nos testes foi constatada pequena flutuação da temperatura na faixa de 25 a 27 °C.

É possível observar variações na velocidade média do escoamento (V_m) apenas para o RL e o TC, em que a V_m tendeu a aumentar conforme o tempo entre os ensaios (Tabela 9). O Neossolo Litólico (RL) e o Luvisolo Crômico (TC) apresentaram diferenças estatísticas entre os períodos de aplicação dos testes com chuvas simuladas. Já para o Latossolo Amarelo (LA) e o Argissolo Vermelho (PV), não houve diferença estatística para esta variável. A descarga líquida unitária do escoamento (q_i) apresenta o mesmo padrão de comportamento observado para a V_m (Tabela 9), provavelmente por consequência dos efeitos do selamento superficial na fase úmida e da formação de crosta superficial após a secagem nos ensaios subsequentes. Para esta variável, é possível observar que somente no TC existe diferença significativa entre os valores, sendo no ensaio aplicado aos 14 dias observada maior q_i com relação as outras épocas, provavelmente como consequência do aumento da V_m e do q_i , observa-se a diminuição da altura da lâmina do escoamento (Tabela 9) nas diferentes épocas de aplicação das chuvas, com diferenças estatísticas significativas apenas no LA.

Tabela 9. Caracterização das variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos para os três ensaios com chuvas simuladas obtidas em condições de laboratório

Variáveis	Tempo (Dias)	Classes de Solos ⁽¹⁾			
		Mais desenvolvidos ⁽²⁾		Menos desenvolvidos ⁽²⁾	
		LA	PV	RL	TC
v $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-7}$	0	8,74 a	8,73 a	8,84 a	9,07 a
	7	8,83 a	8,68 a	8,66 a	9,02 a
	14	8,73 a	8,80 a	8,71 a	9,01 a
Vm m s^{-1}	0	0,03742 a	0,03873 a	0,05071 b	0,03691 b
	7	0,04342 a	0,03956 a	0,05678 ab	0,04273 ab
	14	0,04315 a	0,04143 a	0,05798 a	0,04460 a
qi $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-5}$	0	2,18 a	1,90 a	2,20 a	2,10 b
	7	2,21 a	1,95 a	2,19 a	2,17 ab
	14	2,25 a	1,96 a	2,17 a	2,24 a
h $\text{m} \times 10^{-4}$	0	5,84 a	5,01 a	4,33 a	5,69 a
	7	5,08 b	4,97 a	3,86 a	5,09 a
	14	5,20 ab	4,76 a	3,75 a	5,01 a
n $\text{s m}^{-1/3}$	0	0,05911 a	0,05321 a	0,03570 a	0,05889 a
	7	0,04642 b	0,05085 a	0,02952 a	0,04722 ab
	14	0,04746 ab	0,04717 a	0,02856 a	0,04477 b
Re Adimensional	0	24,99 a	21,81 a	24,85 a	23,17 b
	7	24,97 a	22,45 a	25,30 a	24,11 ab
	14	25,71 a	22,22 a	24,90 a	24,81 a
Fr Adimensional	0	0,49 a	0,56 a	0,78 b	0,49 a
	7	0,62 a	0,57 a	0,92 a	0,60 a
	14	0,60 a	0,61 a	0,96 a	0,64 a
f Adimensional	0	3,28 a	2,90 a	1,31 a	3,28 a
	7	2,12 b	2,60 a	0,94 a	2,19 ab
	14	2,20 ab	2,27 a	0,89 a	1,98 b
τ Pa	0	0,57 a	0,49 a	0,42 a	0,56 a
	7	0,50 b	0,49 a	0,38 a	0,50 a
	14	0,51 ab	0,47 a	0,37 a	0,49 a

Fonte: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013). Legenda: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; v = viscosidade cinemática; Vm = velocidade média; qi = descarga líquida unitária do escoamento; h = altura da lâmina de escoamento; n = coeficiente de rugosidade de Manning; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = fator de perda de carga; τ = tensão cisalhante do escoamento. ⁽²⁾ Solos mais desenvolvidos: $K_i \leq 2,46$; Solos menos desenvolvidos: $K_i > 2,46$. Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esses fatos podem ser atribuídos possivelmente, mas não exclusivamente, aos altos teores da fração areia na composição textural dos solos avaliados, principalmente nos solos menos desenvolvidos (RL e TC), que apresentam cerca de 80% de areia total (Tabela 8), tendo maiores quantidades de partículas prontamente destacáveis, principalmente grãos de quartzo. Provavelmente, o material desagregado e disperso foi reorganizado e orientado superficialmente, ocorrendo à acomodação das partículas e seu rearranjo o que possivelmente, ocasionou a diminuição da rugosidade superficial e da sua resistência aos efeitos da enxurrada, aumentando a velocidade de escoamento, o que corrobora com o que foi observado em análise micromorfológica por Dalla Rosa et al. (2013), com auxílio de microscópio óptico em um Argissolo Vermelho-Amarelo, com 82% de areia em sua composição.

Observa-se na Tabela 9 a diminuição do coeficiente de rugosidade de Manning (n) e do fator de perda de carga (f) a cada teste de simulação de chuva aplicada, havendo diferenças estatísticas entre os valores apenas para o LA e o TC. O coeficiente de rugosidade de Manning (n) e o fator perda de carga (f) representam o fator de resistência que a superfície do solo oferece ao deslocamento do escoamento, e sua diminuição indica, possivelmente, a homogeneização da superfície dos solos, devido ao processo de formação de crosta superficial (Maier et al., 2013). Comportamento semelhante foi observado por Hu et al. (2012) que, avaliando o desenvolvimento de crostas superficiais no solo, em condições de chuva simulada, descrevem que o encrostamento superficial influencia na erosão do solo ao reduzir a rugosidade superficial, infiltração de água e erosão por salpicamento, ao mesmo tempo que aumenta o escoamento superficial.

A tensão cisalhante do escoamento (τ) reflete na quantidade de energia necessária para desagregar o solo e, portanto, na concentração de sedimentos na enxurrada. Houve diferença significativa entre os valores de τ entre os períodos de aplicação das chuvas apenas no LA (Tabela 9), porém, é possível observar leve tendência de diminuição nos valores para os demais solos, se analisados de forma absoluta.

Na Tabela 10, observa-se o comportamento da perda de solo (PSi), da taxa de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e da erodibilidade em entressulcos (K_i) dos solos nos diferentes períodos de aplicação de chuva simulada, na qual verifica-se que o LA e o TC não apresentaram diferenças significativas para a PSi nos diferentes períodos de aplicação das chuvas simuladas, enquanto que o PV e o RL apresentaram maiores valores de PSi no primeiro ensaio (0 dias), diferindo estatisticamente do segundo e terceiro ensaios. Verifica-se ainda que não houve diferença estatística significativa entre os valores de PSi , D_i e K_i apresentados no segundo (7 dias) e terceiro (14 dias) ensaios em nenhum

dos solos avaliados (Tabela 10) indicando que a crosta superficial já se forma após 7 dias. Essa relação sinérgica entre PSi , D_i e K_i foi observada por Freitas et al. (2008) trabalhando com Luvisolos no semiárido, em que as perdas de solos, a taxa de desagregação e a erodibilidade do solo foram diretamente proporcionais.

Tabela 10. Perdas totais de solo (PSi), taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos (D_i) e fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i), obtidos em condições de laboratório, sob chuva de 85 mm h^{-1} ($i = 2,36 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) e declividade de $0,10 \text{ m m}^{-1}$ em três épocas de aplicação

Variáveis	Tempo (Dias)	Classes de Solos ⁽¹⁾			
		Mais desenvolvidos ⁽²⁾		Menos desenvolvidos ⁽²⁾	
		LA	PV	RL	TC
PSi kg m^{-2}	0	0,08840 aB	0,19143 aA	0,20850 aA	0,01777 aB
	7	0,29967 aA	0,04140 bA	0,02917 bA	0,01897 aA
	14	0,19400 aA	0,02603 bA	0,01583 bA	0,01523 aA
D_i $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^{-4}$	0	9,47 aA	9,77 aA	9,26 aA	4,23 aB
	7	5,00 bA	5,22 bA	4,67 bA	3,98 aA
	14	3,67 bA	3,74 bA	3,66 bA	3,69 aA
K_i $\text{kg s m}^{-4} \times 10^6$	0	3,54 aA	3,69 aA	3,41 aA	1,60 aB
	7	1,89 bA	1,97 bA	1,75 bA	1,49 aA
	14	1,36 bA	1,39 bA	1,39 bA	1,38 aA

Fonte: ⁽¹⁾ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013); Legenda: LA = Latossolo Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; RL = Neossolo Litólico; TC = Luvisolo Crômico; D_i = taxa de desagregação do solo em entressulcos; K_i = erodibilidade em entressulcos. ⁽²⁾ Solos mais desenvolvidos: $K_i \leq 2,46$; Solos menos desenvolvidos: $K_i > 2,46$. Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas, e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De forma geral, o TC apresentou comportamento diferenciado dos demais solos, mesmo apresentando em sua composição textural cerca de 80% de areia total. Os altos teores de carbono orgânico e óxidos de ferro e alumínio em sua composição, atuando como agentes cimentantes, podem ter influenciado diretamente para um alto índice de estabilidade dos agregados (Tabela 8), conferindo resistência à desagregação, bem como a modificações mais drásticas em sua estrutura devido aos processos envolvidos na formação do solo superficial e, posteriormente, da crosta superficial, apresentando os menores valores para PSi , D_i e K_i (Tabela 10), e comportamento estável, sem alterações drásticas entre as aplicações de chuva simulada, demonstrando maior estabilidade estrutural em detrimento aos demais solos.

Lado & Ben-Hur (2004), avaliando os efeitos da mineralogia do solo na formação de selo superficial, no escoamento superficial e na perda de solo, concluíram que, em solos com teores elevados de quartzo e feldspato (partículas que apresentam cargas superficiais próximas a zero), a estabilidade dos agregados é controlada principalmente por outros agentes, como matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio, o que pode explicar o comportamento do Luvissoilo Crômico (TC) avaliado neste estudo.

Na Figura 5 é possível observar que a maior concentração de sedimentos em suspensão ocorre na primeira chuva aplicada nos solos descobertos, com exceção ao TC, que demonstrou apresentar maior estabilidade estrutural possivelmente devido à resistência dos agregados e das frações de areia muito grossa e grossa (Tabela 8), que pode ter atuado na superfície do solo oferecendo resistência ao fluxo laminar da água.

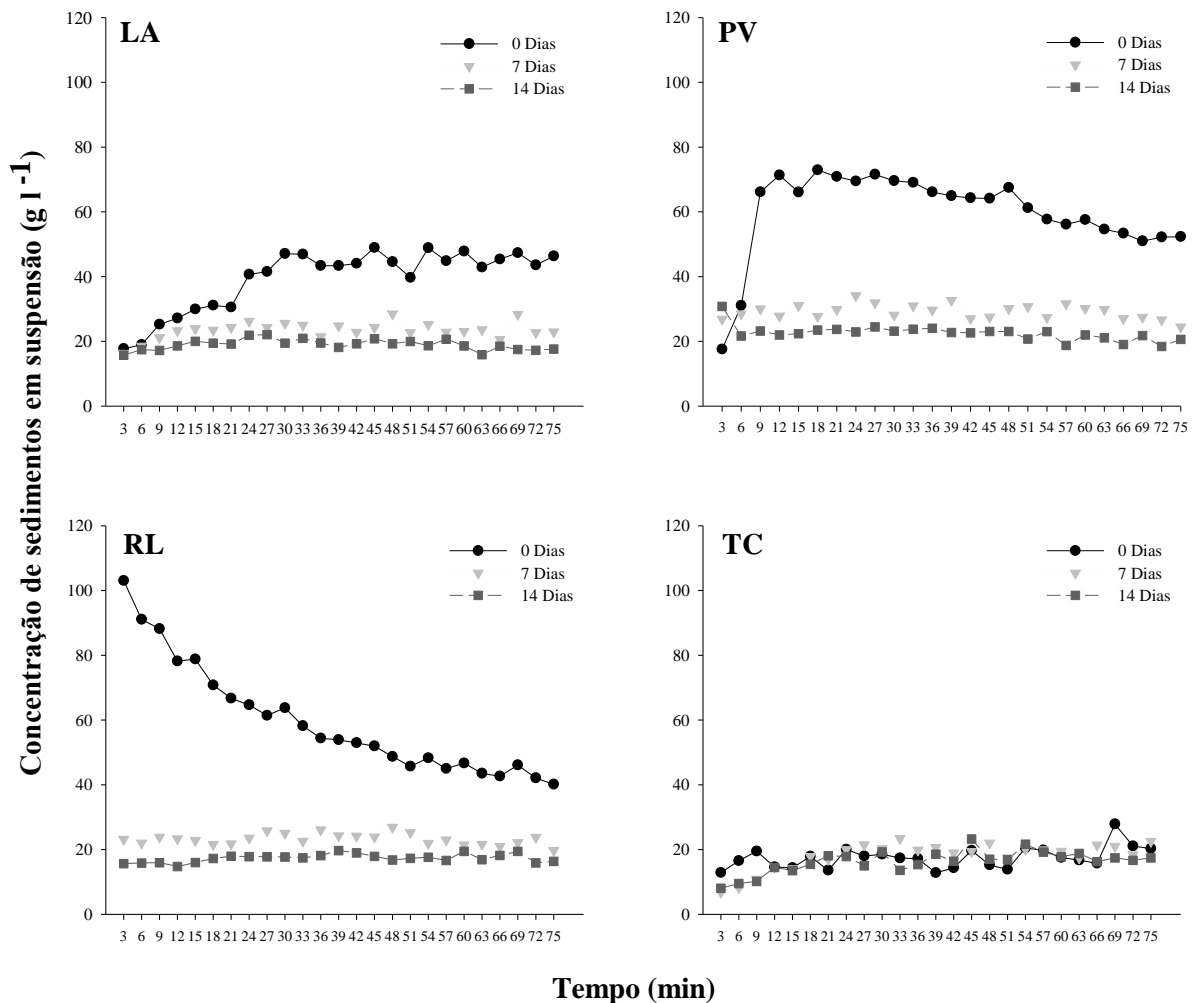


Figura 5. Concentração de sedimentos em suspensão para: Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Litólico (RL) e Luvissoilo Crômico (TC), ao longo da duração de aplicação das chuvas nos tempos de ensaio 0, 7 e 14 dias.

A maior concentração de sedimentos em suspensão no primeiro evento de aplicação de chuva simulada pode ser atribuída, possivelmente, à disponibilidade de partículas prontamente destacáveis e de fácil transporte, presentes na composição textural dos solos, e a destruição de agregados menos estáveis, se dividindo em partículas menores e mais suscetíveis ao arraste.

Semelhante ao observado na Figura 5, Zhang et al. (2017), buscando compreensão sobre os processos de erosão em entressulco usando elementos traços de terras raras, realizaram seis eventos consecutivos de chuva simulada, em intervalos de 3 dias, utilizando um Argissolo Vermelho, observaram o aumento gradual da descarga de sedimentos na primeira chuva até atingir nível do estado quase estacionário no final do evento de precipitação, bem como após poucos minutos em cada evento de chuva subsequente e permaneceram mais ou menos constantes ao longo de cada evento, corroborando com o comportamento verificado nos solos avaliados neste estudo.

A formação da crosta começa com a dispersão de agregados e grânulos de médio e grande porte devido ao impacto da gota de chuva, resultando na diminuição do tamanho dos poros na superfície do solo devido às partículas finas dispersas que encham os poros maiores (Hu et al., 2012). Estes autores concluíram que a textura do solo foi o primeiro fator primário envolvido na formação de diferentes tipos de crostas do solo. Solos com diferentes texturas tem diferentes padrões de fragmentação e erosão em resposta à precipitação, e que estas diferentes respostas influenciam o desenvolvimento da crosta de maneiras distintas (Figura 5), confirmando os resultados de Hu et al. (2012).

Na Figura 6, é possível observar a evolução das modificações causadas pelos eventos de chuva simulada na rugosidade superficial do solo, pelo processo contínuo e simultâneo de destacamento, transporte e sedimentação de partículas ao longo do tempo de precipitação. Em cada um dos solos avaliados, nota-se comportamento semelhante durante a aplicação do primeiro evento de chuva simulada (0 dias), no qual ocorre a redução na rugosidade superficial do solo (R^2 entre 0,73 e 0,93 e $p < 0,01$) em todos os solos), indicando a ocorrência de selamento superficial, e todos os processos envolvidos, levando a uniformidade do microrrelevo e a alteração nas características hidráulicas do escoamento discutidas anteriormente, pela redução das forças de resistência do solo ao escoamento.

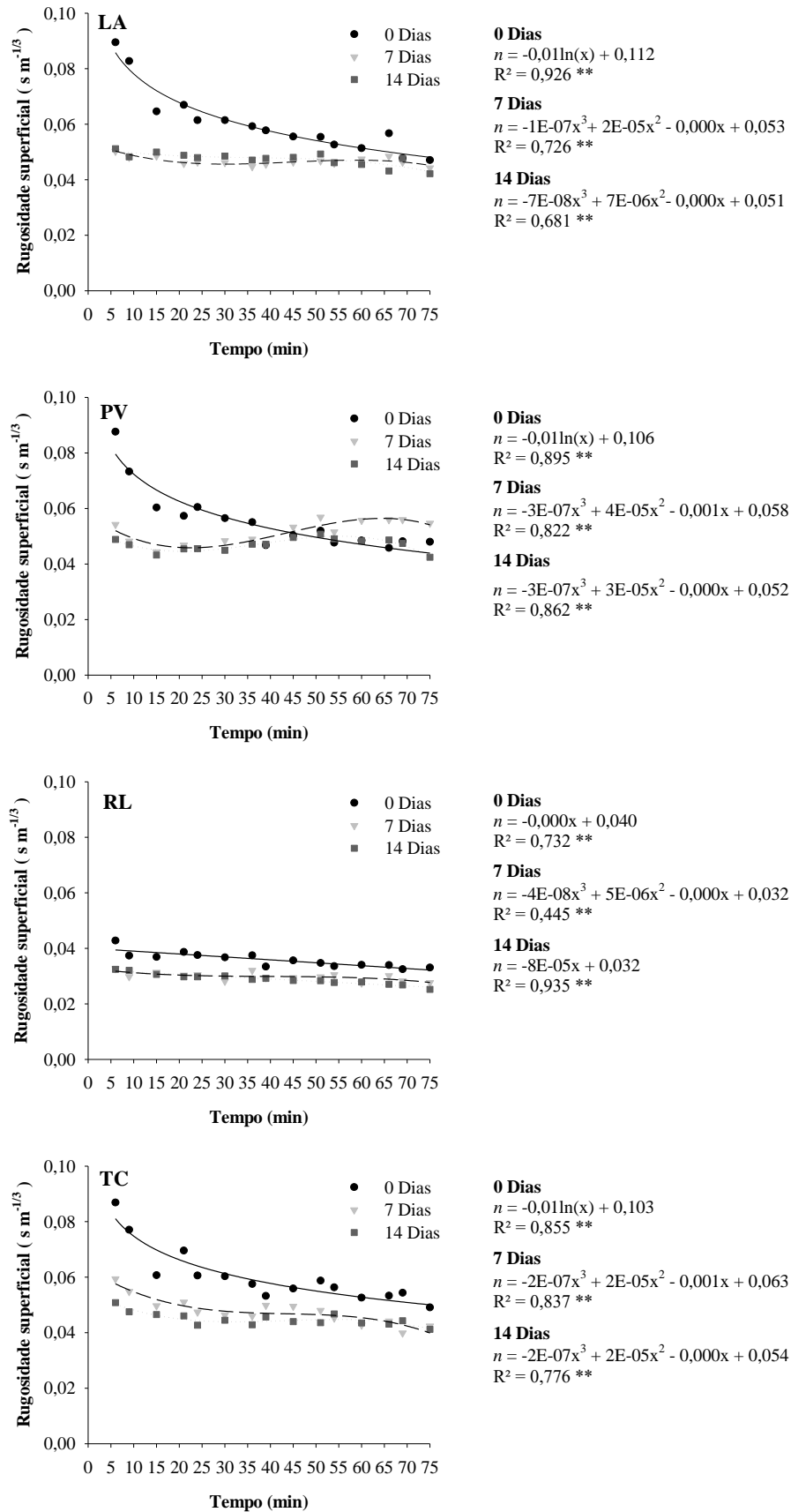


Figura 6. Evolução da rugosidade superficial de Manning (n) no Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Litólico (RL) e Luvissolo Crômico (TC) ao longo da duração de aplicação das chuvas nos tempos de ensaio 0, 7 e 14 dias

Os solos avaliados apresentaram comportamentos semelhantes quando analisados o segundo e o terceiro eventos de chuvas simuladas (aos 7 e 14 dias) como pode ser observado na Figura 5 (confirmando comportamento das médias apresentadas na Tabela 10), sendo os maiores valores para o coeficiente de ajuste do modelo (R^2) obtidos através da utilização do modelo polinomial de 3ª ordem (polinomial cúbico), com exceção do RL, que, para o seu comportamento no evento de chuva simulada aplicada aos 14 dias, o modelo linear foi o mais adequado. Possivelmente, o modelo polinomial cúbico, reflete de forma mais adequada o comportamento dos eventos de destacamento, transporte e sedimentação que ocorrem durante processo de erosão hídrica, após a formação de uma crosta superficial, devido a ser apresentado em ordens que representam modificações no sentido do comportamento na tendência das curvas. Por esses eventos ocorrerem de forma simultânea e contínua durante os eventos de precipitação, mesmo partículas que já foram destacadas, transportadas e sedimentadas, podem, ao longo do tempo e do espaço (comprimento da faixa de solo), serem novamente destacadas, transportadas e sedimentadas em outro ponto do terreno (Zhang et al., 2017; Zhang & Wang, 2017) causando efeito gráfico visualizado em forma de onda senoidal.

A diminuição e estabilização na concentração de sedimentos em suspensão (Figura 5), em conjunto com a interpretação do comportamento da rugosidade superficial (Figura 6) nas chuvas aplicadas nos períodos de 7 e 14 dias, ou seja, subsequentes à formação de crosta superficial, estão em consonância com o observado por Armenise et al. (2018) que, avaliando as dinâmicas estruturais, físicas e hidrológicas no desenvolvimento do selamento superficial sob chuva simulada, afirmam que o desenvolvimento do selo pode ser contínuo, e um equilíbrio dinâmico entre a destruição e a formação do selo pode ser estabelecido. Observa-se nas figuras 5 e 6 que, mesmo não havendo modificações nas quantidades de sedimento em suspensão, ocorrem modificações na rugosidade superficial do solo ao longo do tempo de duração da chuva, demonstrando que ocorre a quebra das crostas e posterior realocação das partículas de solo em outros pontos do espaço, formando novos selamentos e posteriormente novas crostas em outros pontos, onde possivelmente já ocorreu o mesmo fenômeno.

De Roo & Riezebos (1992) afirmam que, quando se aplicam precipitações pluviais sucessivas ao solo, a maior porção da camada de encrostamento se desenvolve logo com a aplicação inicial; o efeito das chuvas subsequentes é menos relevante no decréscimo da taxa de infiltração e nas variáveis hidráulicas do escoamento, o que se assemelha aos resultados encontrados neste experimento (Tabela 10, Figuras 5 e 6). Comportamento semelhante também foi observado por Zonta et al. (2012), avaliando o efeito da aplicação

sucessiva de precipitações pluviais com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo, em que os autores constataram a formação do encrostamento superficial já com a primeira aplicação de chuva, exercendo papel fundamental no comportamento das variáveis hidráulicas do escoamento e na infiltração nos ensaios subsequentes.

É possível inferir ainda que, o impacto de vários dias de eventos de precipitação na rugosidade superficial e na formação de crostas superficiais podem ser observados na resistência da crosta física dos solos, que tende a aumentar a cada aplicação de chuva subsequente, demonstrando os efeitos cumulativos do selamento superficial e da posterior consolidação da crosta superficial, conforme observado também por Bullard et al. (2018), estudando os mesmos efeitos em solos de região semiárida oriental da Austrália.

CONCLUSÕES

1. A formação e a presença de crosta superficial foram observadas, de forma indireta, no Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV) e no Neossolo Litólico (RL), devido ao aumento da velocidade média de escoamento e da descarga líquida, diminuição da altura da lâmina de água, bem como devido as alterações na concentração de sedimentos em suspensão, perdas totais de solo (PS_i), taxa máxima de desagregação (D_i) e fator de erodibilidade em entressulcos (K_i). Para o Luvisolo Crômico (TC), seriam necessárias análises mais detalhadas, como a micromorfológica, para confirmação da formação da crosta superficial, pois não houve alterações significativas nas características avaliadas nesse estudo;
2. A maior contribuição para a formação do encrostamento superficial ocorre no primeiro ensaio de chuva simulada (tempo 0), sendo o efeito das chuvas subsequentes menos significativas para concentração de sedimentos em suspensão, perdas totais de solo, taxas de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos para Latossolo Amarelo (LA), Argissolo Vermelho (PV) e Neossolo Litólico (RL);
3. Apesar de haver modificações significativas na rugosidade superficial do Luvisolo Crômico (TC), o mesmo não apresenta significância nas alterações causadas por sucessivos eventos de chuva simulada nas perdas totais de solo, nas taxas de desagregação e na erodibilidade do solo em entressulcos, mantendo-se estável;
4. Após a formação de crosta superficial, eventos de precipitação subsequentes tendem a resultar em equilíbrio dinâmico entre a destruição e a formação do selo superficial de forma contínua ao longo da duração das chuvas;

REFERÊNCIAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Climatologia**. <https://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/climatologia/>. Acesso em: 08 de fev. 2019.

ARMENISE, E.; SIMMONS, R. W.; AHN, S.; GARBOUT, A.; DOERR, S. H.; MOONEY, S. J.; STURROCK, C. J.; RITZ, K. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 211-219, 2018.

ASSOULINE, S. Rainfall-induced soil surface sealing: A critical review of observations, conceptual models and solutions. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 2, p. 570-591, 2004.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 23, p. 711-721, 1999.

BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; MENEZES, S. J. M. C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 30, p. 13-21, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisa e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **I. Levantamento exploratório de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

BULLARD, J. E.; OCKELFORD, A.; STRONG, C. L.; AUBAULT, H. Impact of multi-day rainfall events on surface roughness and physical crusting of very fine soils. **Geoderma**, v. 313, p. 181-192, 2018.

CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; OLIVEIRA, O. F. L.; MELO, R. O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividades e doses de cobertura morta. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 68-74, 2009.

CARMI, G; BERLINER, P. The effect of soil crust on the generation of runoff on small plots in an arid environment. **Catena**, v.74, n 1, p. 37-42, 2008.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 685-690, 2004.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BALIEIRO, F. C. **Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 57).

CHEN, Y.; TARCHITZKY, J.; BROUWER, J.; MORIN, J.; BANIN, A. Scanning electron observations on soil crusts and their formation. **Soil Science**, v. 12, n. 1, p.49-55, 1980.

CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill. 1959. 690 p.

DALLA ROSA, J.; COOPER, M.; DARBOUX, F.; MEDEIROS, J.C. Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 37, p. 400-410, 2013.

DE ROO, A. P. J.; RIEZEBOS, H. T. Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. **Catena**, v. 19, p. 221-239, 1992.

ELLIOT, W. J.; LIEBNOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88**. West Lafayette: The Ohio State University and USDA-ARS, 1989. (Report, 3).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2013. 353 p.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I. Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.

FORSYTHE, W. M. **Física de suelos**: manual de laboratório. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1975. 212 p.

FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y. A process-based analysis of the influence of aggregate stability on surface crusting, infiltration, and interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 62, p. 717-724, 1998.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; SANTOS, D.; MATOS, R. M. Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Rev. Bras. de Geografia Física**, v. 8, p.1006-1016, 2015.

FREITAS, F. J.; CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; OLIVEIRA, M. D. R.; LIMA, P. A.; FIGUEIRA, S. B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, n. 4, p. 1743-1751, 2008.

FREITAS, T. S. **Atributos físicos de solos representativos do estado da paraíba**. 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 73-89.

HU, X.; LIU, L. Y.; LI, S. J.; CAI, Q. G.; LÜ, Y. L.; GUO, J. R. Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide. **Pedosphere**, v. 22, p. 415-424, 2012.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Melbourne: Cambridge Univ. Press. 1995. 280 p.

KATZ, D. M.; WATTS, F. J.; BURROUGHS, E. R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal Hydrology Division**, v. 121, p. 546-553, 1995.

KINNELL, P. I. A. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 2815-2844, 2005.

LADO, M.; BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, v. 24, n. 3-4, p. 209-224, 2004.

LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M. J. Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 57, p. 224-229, 1993.

LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; LECOMTE, V.; BENKHADRA, H.; SOUCHERE, V.; MARTIN, P. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. **Catena**, v. 62, p. 111-124, 2005.

LIEBENOW, A. M.; ELLIOT, W. J.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. O. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 33, p. 1882-1888, 1990.

MAIER, C.; KAUFMANN, V.; MERTEN, G. H.; CASTRO, N. M. R.; OLIVEIRA, F. P. Efeito da crosta superficial na erosão entressulcos de um Neossolo Litólico submetido a diferentes usos e manejo. **Rev. Bras. de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 149-163, 2013.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple intensity rainfall Simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 22, p. 100-103, 1979.

OLIVEIRA, F. H. T.; LEAL, J. V.; SANTOS, D.; FARIAS, D. R.; ARRUDA, J. A. Banco de solos representativos do Estado da Paraíba. In: REUNIÃO BRESILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA AGUA (RBMCSA), 16., 2006, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: SBCS, 2006. Resumos. CD-ROM.

PEQUENO, P. L. L. **Funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água em solos da mesorregião do agreste paraibano**. 2016. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

R CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. Version 3.5.1. “Feather Spray”. Vienna, Austria. **R Foundation For Statistical Computing**, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SALCEDO, I. H.; SOUZA, A. P.; SILVA, V. D. M. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, p. 1301-1310, 2011.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch photochemische Extraktion mit saurer Ammonium-Oxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde*, v. 105, p. 194-202, 1964.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. **Sediment transport technology**: water and sediment dynamics. Littleton: Water Resources Publication, 1992. 897p.

SINGH, V. P. Analytical solutions of cinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advanced Water Research**, v. 6, p. 88-95, 1983.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ANGULO-JARAMILLO, R.; VAUCLIN, M. Effect of crusting on the physical and hydraulic properties of a soil cropped with Castor beans (*Ricinus communis* L.) in the northeastern region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 141, n. 8, p. 55-61, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TISDALL, J. M.; COCKROFT, B.; UREN, N. C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. **Aust. J. Soil Res.**, v. 16, p. 9-17, 1978.

TOUMA, J.; RACLOT, D.; AL-ALI, Y.; ZANTE, P.; HAMROUNI, H.; DRIDI, B. In situ determination of the soil surface crust hydraulic resistance. **Journal of Hidrology**, v. 403, n. 3, p. 253-260, 2011.

VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, v. 55, p. 225-45, 1992.

WILLIAMS, A. J.; PAGLIAI, M.; STOOPS, G. Physical and Biological Surface Crusts and Seals. *In*: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F (Ed). **Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths**. 2 ed. Elsevier, 2018. p. 539-574.

WOOLHISER, D. A.; LIGGETT, J. A. Unsteady onedimensional flow over a plane - The rising hydrograph. **Water Resources Research**, v. 3, p. 753-771, 1967.

ZHANG, X. C.; WANG, Z. L. Interrill soil erosion processes on steep slopes. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 652-664, 2017.

ZHANG, X. C.; NEARING, M. A.; GARBRECHT, J. D. Gaining insights into interrill erosion processes using rare earth element tracers. **Geoderma**, v. 299, p. 63-72, 2017.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; SANTOS, M. R. Efeito da aplicação sucessiva de precipitações pluviais com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 36, p. 377-388, 2012.